第Ⅰ部門　　継手疲労寿命延伸に対する付加溶接の影響評価

大阪大学 接合科学研究所　学生員　○髙田　耕庸
正会員　堤　成一郎
正会員　Fincato Riccardo

1. 緒言

溶接継手の疲労強度向上手法として，グラインダーや TIG 処理，各種ピーニングなどがあり，一部手法は疲労寿命改善策として規格化されている[1]．また，比較的容易に溶接止端の応力集中を低減させ，疲労寿命を延伸する手法の一つとして，付加溶接の適用事例も報告されている．先行研究の実験的検討[2]において，付加溶接は新規および予荷重を経験した荷重非伝達型十字継手の何れに対しても疲労寿命延伸の効果があり，加えて溶接止端部のグラインダーにより，さらなる効果が得られることが示されている．一方，著者らはこれまでにピーニングによる残留応力の緩和挙動が疲労寿命に与える影響の検討や溶接継手 HAZ 部の材料挙動が疲労き裂発生寿命に与える影響の検討[3]を行っている．

そこで本研究では，先の荷重非伝達型十字継手に対する実験的検討[2]を対象として，溶接継手のビード形状や角変形量と疲労試験状況を反映した繰返し弾塑性解析を行う．また得られた応答を用いた疲労き裂発生寿命評価を実施し，疲労試験結果と比較を行う．また，付加溶接ままより大きな疲労強度の向上が見られた付加溶接の止端にグラインダー処理を施した継手についても併せて検討を行う．それらにより，疲労強度に及ぼす付加溶接やグラインダーの影響を明らかにすることを目的とする．

2．実験結果および解析条件

Fig.1 に先行研究[2]により得られた疲労試験の結果を示す．継手溶接止端部から 5mm 離れた位置に貼付したひずみゲージの応答の 5%変動時の回数を疲労き裂発生寿命（Nc），継手が破断した回数を破断寿命（Nf）としている．また試験は，AsWeld（溶接まま），D0（付加溶接後に疲労試験），D70（予損傷後に付加溶接を施工し再試験），D70G（予損傷後に付加溶接とグラインダーを施工し再試験）の計 4 種類に対して実施されている．これより JSSC 等級では E 等級程度である AsWeld 試験体に付加溶接を施すことで 1 等級程度，グラインダーを施すことでさらに 1 等級程度の疲労強度改善効果が認められている．

次に，FE モデルに関して概説する（Table 1, Fig.2 参照）．AsWeld（Model AW），D0（Model AD），D70G（Model G）の各試験体の継手長手方向の形状を 5 ライン測定した結果，得られた最小止端半径（ρ）はそれぞれ 0.26, 0.37, 2.37[mm]，角変形量(2δ)は 0.32, 0.32, 0.56[deg.]であり，各継手のモデル形状として採用した．境界条件および各モデルの止端形状は Fig.2 に示す通りである．

3．数値解析的検討

疲労き裂発生寿命(Nc)の算出を行うために材料の弾塑性応答を考慮した疲労試験の再現シミュレーションを行った．なお材料モデルには疲労 SS モデル[3,4]を採用し，解析ソルバーには Abaqus6.14-3 を使用した．解析

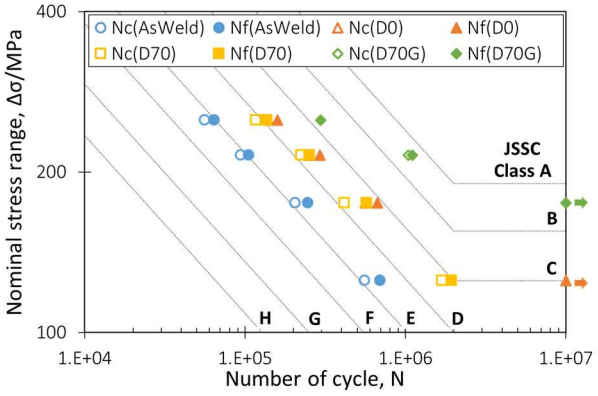

Fig.1 S-N 線図（実験結果）[2]

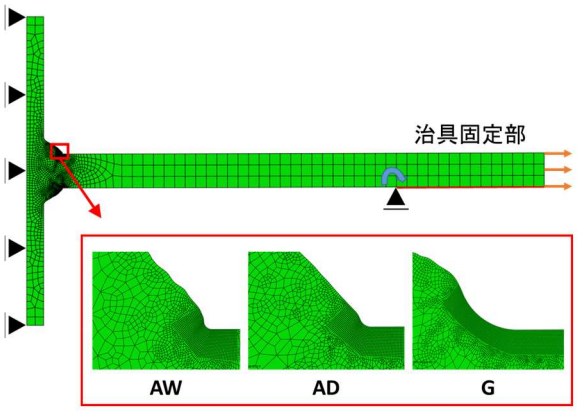

Fig.2 解析モデルおよび境界条件

Table1. モデル概要

Model name	AsWeld(Model AW)	D0(Model AD)	D70G(Model G)
Toe radius: ρ[mm]	0.26	0.37	2.37
Distortion angle: 2δ[deg.]	0.32	0.32	0.56

Koyo TAKATA, Seiichiro TSUTSUMI, Riccardo FINCATO
tsutsumi@jwri.osaka-u.ac.jp

モデルには Fig.2 に示す FE モデルを用いた．Fig.3 に示すように，疲労試験を模擬した弾塑性解析から得られた累積相当塑性ひずみ最大の要素における局所的な応力ひずみ応答を取得し，その結果得られた繰返し載荷回数 100 回時点の軸ひずみ範囲($\Delta\varepsilon_t$)と平均応力(σ_m)の影響を考慮した疲労寿命評価予測式を用いることにより疲労き裂発生寿命（Nc）を算出した．

疲労き裂伝播寿命(Np)の算出は破壊力学に基づいて行った．応力拡大係数およびき裂進展経路の算出には XFEM を用い，初期き裂は繰返し弾塑性解析における累積相当塑性ひずみ最大の要素と 2 番目の要素の間に 0.05mm の長さで挿入した．

解析から得られた各き裂長さの時の応力拡大係数(ΔK)と Paris 則 [1]を用いることでき裂伝播寿命(Np)を算出した．Paris 則のパラメータには JSSC の疲労設計指針における平均設計曲線の値を用いている．

算出したき裂発生寿命(Nc)とき裂伝播寿命(Np)を足し合わせることで疲労寿命(Nf)を算出した．Fig.4 に $\Delta\sigma$=250MPa の時の各モデルの疲労寿命を，Fig.5 に算出した疲労寿命(Nf)と実験結果の S-N 線図の比較を示す．Fig.4 より，疲労寿命が短い Model AW ではき裂伝播寿命(Np)が疲労寿命に支配的であり，疲労寿命が長い Model G ではき裂発生寿命(Nc)が支配的であることがわかる．それぞれの疲労寿命は Model AW に比べ AD が約 1.4 倍，G が約 4.5 倍であり止端形状の変化の変化による疲労寿命延伸効果が確認された．また Fig.5 より，計算結果の疲労寿命は Model G, AD, AW の順に長くなっており，実験結果を概ね再現できていることがわかる．しかし，高寿命側の Model G で計算結果と実験結果の傾きが異なる結果となった．これは，Model G ではき裂発生寿命(Nc)が支配的であるが，本研究で用いた FE モデルにはき裂発生寿命に影響が大きい溶接による HAZ 部の材料特性の変化 [3]を考慮していないためだと考えられる．

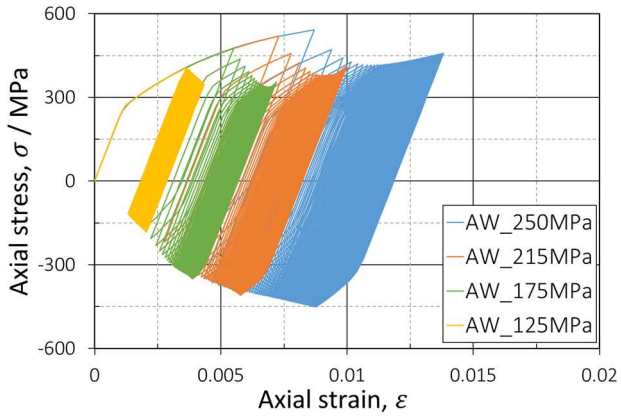

Fig.3 局所域の応力ひずみ応答

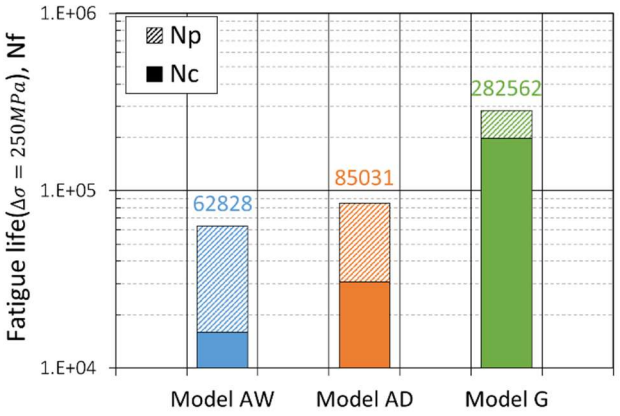

Fig.4 疲労寿命 Nf（$\Delta\sigma$=250MPa）

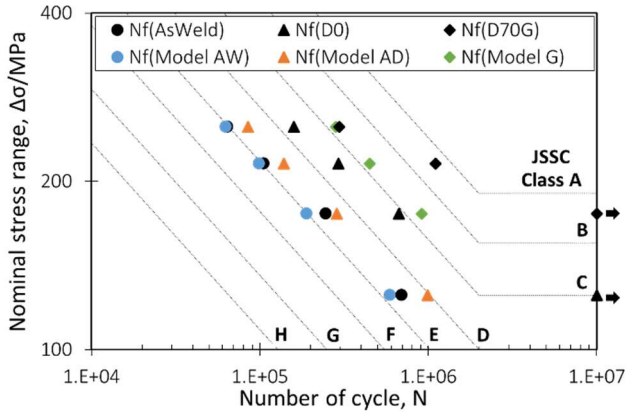

Fig.5 S-N 線図（計算結果）

4．結言

本研究では溶接十字継手に対する付加溶接およびグラインダー処理の疲労寿命延伸効果に関して，試験体形状を模擬した解析モデルを用いて検討を行い，1. AsWeld 試験体ではき裂伝播寿命が支配的であり，付加溶接およびグラインダー処理を施した D0, D70G 試験体ではき裂発生寿命が支配的であること 2. 250MPa の応力範囲に対して疲労寿命は付加溶接による止端形状の変化で約 1.4 倍，グラインダー処理による止端形状の変化では約 4.5 倍の疲労寿命延伸効果があること 3. 試験体形状を模擬した数値解析によって実験結果の傾向を概ね再現できることが確認できた．

今後の課題として，溶接による HAZ 部の材料特性の変化や引張残留応力，グラインダーによる止端部表面の損傷などを考慮し，より実験の再現性を高めた疲労寿命評価が望まれる．

参考文献

1)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012
2)白土ほか：溶接継手の疲労強度に及ぼす付加溶接の影響，日本船舶海洋工学会講演会論文集，52, 347-352, 2017
3)平出ほか：溶接継手疲労寿命に及ぼす熱影響部の繰返し負荷下の材料挙動の影響，溶接学会論文集，36(2), 145-151, 2018
4) S.Tsutsumi, R.Fincato, Cyclic plasticity model for fatigue with softening behaviour below macroscopic yielding, Materials & Design, 165, (2019), 107573