

川崎製鉄 正会員○永津 省吾
名古屋大学 正会員 山田健太郎

1. まえがき 溶接構造物の疲れ照査に用いる設計S-N線図は、継手別に行なわれた疲れ試験結果の95%信頼区間の下限値より求められる。しかし、疲れ限度近くの低応力範囲が作用する領域、すなわち長寿命域(例えば 5×10^6 回)に対する疲れ試験結果は少ない。BS5400(1980), ECCS(1985)の疲労設計指針では、それぞれ 10^7 回、 5×10^6 回以上の長寿命域について設計S-N線図の傾きを緩くすることにより対応している。また、溶接止端やブローホール、アンダーカットなどの応力集中部を有する溶接継手では、破壊力学の手法により解析的に得られる疲れき裂進展寿命 N_p を疲れ寿命として評価できるが、これまで設計S-N線図に必要となる疲れ寿命のばらつきについてはそれ程詳しく検討されていない。

そこで、疲れ寿命に影響を及ぼす各種要因の確率分布を評価し、モンテカルロ・シミュレーションにより疲れき裂進展寿命解析を行ない、疲れ寿命のばらつきを評価した。特に通常実験結果の得にくい、疲れ寿命が200万回を越えるような高サイクル領域に対して検討した。

2. 解析の対象とした継手と解析方法 対象とした継手は、非仕上げのリブ十字形すみ肉溶接継手(Fig.1)である。き裂は溶接止端部に発生し、主応力に垂直に半楕円形状で進展する。この継手では、初期き裂長さ a_0 、止端角 θ 、止端半径 ρ 、初期き裂形状 $(a/b)_0$ が疲れ寿命のばらつきに影響を及ぼすことがわかっている。そこで、各要因に関するデータを収集し、確率分布を与えて疲れき裂進展寿命 N_p を計算した。いずれのパラメータも打ち切り型対数正規分布

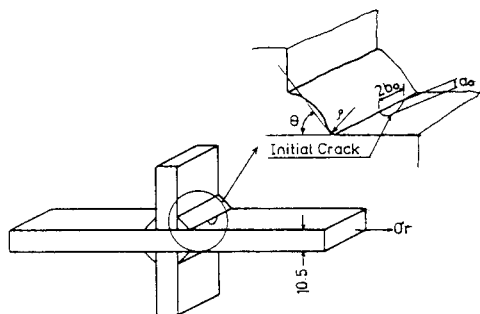


Fig.1 Analytical Model of Non-Load Carrying Fillet Welded Joint

$$f(x) = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi} \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

に従うと仮定した。(Fig.2)初期き裂の分布は文献1)より、止端角、止端半径、初期き裂形状の分布は過去の測定結果より求めた。き裂形状は、き裂の進展に伴って変化し、最終き裂長さで一定値に収束するようにした。

疲れき裂進展寿命 N_p は、応力拡大係数範囲 ΔK のしきい値 ΔK_{th} を考慮した疲れき裂進展速度式を数値積分することにより、次式のように求まる。

$$N_p = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)} da \quad (2)$$

ここで、 a_0 は初期き裂長さであり、最終き裂長さ a_f は板厚の85%、材料定数 C 、 m 、 ΔK_{th} は、金属材料技術研究所で求めたSM50B材に対する値を用いた。 ΔK は、き裂長さ a 、公称応力範囲 σ_r に対して、

$$\Delta K = \sigma_r \sqrt{\pi a} \cdot F_s \cdot F_e \cdot F_t \cdot F_g \quad (3)$$

で表わされる。 F_s 、 F_e 、 F_t 、 F_g はそれぞれ、自由表面、き裂形状、板厚(板幅)、幾

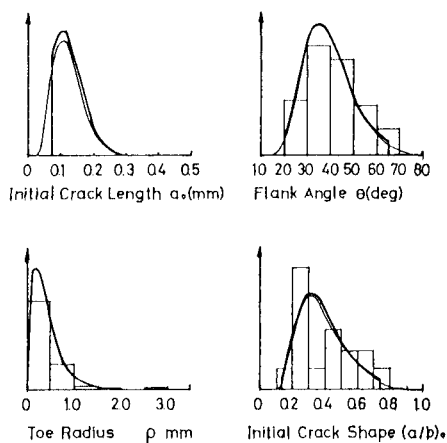


Fig.2 Distribution of Parameters

何学的な形状による影響を考慮した補正係数である。 F_s 、 F_e はき裂形状の関数、 F_g は FEM による止端部の応力集中係数より求められ、止端角、止端半径によって値が異なる。

3. 解析結果 45～210MPa の範囲で9段階の σ_r についてシミュレーションを行なった。45～50MPa では2000回、55～210MPa では1000回計算を行なった。210, 130, 80MPa の時の N_p のヒストグラム、各応力範囲に対する N_p の平均値を Fig.3に示す。ここで繰返し数が 10^9 回以上になるもの、初期き裂長さに対する ΔK が ΔK_{th} より小さいものは未破断として除外した。 $\sigma_r = 210, 130\text{MPa}$ に比べて、 $\sigma_r \leq 80\text{MPa}$ では、 N_p

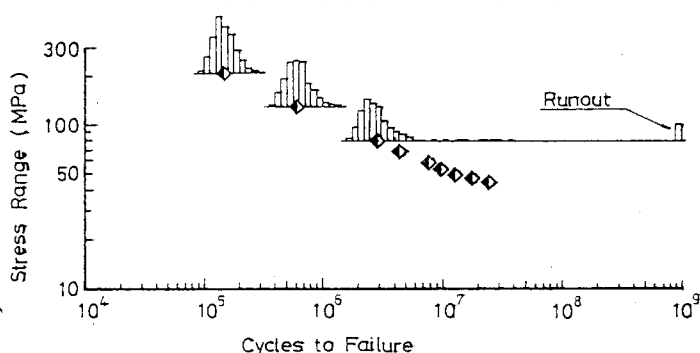


Fig.3 Result of Simulation

の分布は ΔK_{th} の影響を受けて右側に大きく裾を引いた形になった。また、応力範囲が小さくなるにつれて未破断となる割合が大きくなり、 $\sigma_r = 45\text{MPa}$ では、99%が未破断となった。

$\sigma_r \leq 80\text{MPa}$ では正規分布から外れる未破断データが多くなるため、下から 2.5%に相当するシミュレーション値 $N_{p2.5}$ を便宜的に95%信頼区間の下限值とした。この結果を ECCS, BS5400 の設計 S-N 線図と比較した。(Fig.4) $N_{p2.5}$ は $\sigma_r = 80 \sim 50\text{MPa}$ で ECCS の設計 S-N 線図とよく似た傾向を示した。ECCS では、定振幅疲れ限度を 500 万回に対して 59MPa としているが、シミュレーション結果では2000万回付近に対して 48MPa 程度と約 1/1.2 になった。

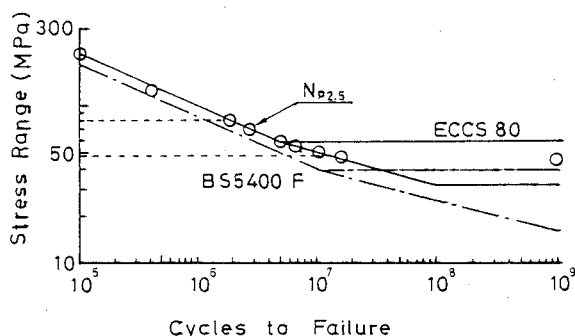


Fig.4 Comparison with Design Curves of ECCS and BS5400

4. まとめ 破壊力学とモンテカルロ・シミュレーションの手法を用いてリブ十字すみ肉溶接継手について疲れ寿命のばらつきを調べた。 ΔK_{th} の影響を請けて疲れ寿命が増加したり、未破断となる応力範囲では下から ($0.025 \times$ シミュレーション回数) 番目の値によって疲れ寿命の95%信頼区間の下限値を評価した。シミュレーション結果はECCSの設計S-N線図と傾向がよく似ているが、定振幅疲れ限度はECCSの値より小さくなった。

今回の報告の他に、I型溶接桁、ガセット継手についても同様に、疲れ寿命のばらつきを評価した。溶接桁では、溶接部の長さにより、シミュレーション結果のばらつきの大きさが異なった。ガセット継手では、初期き裂形状をエッジクラックと仮定した場合、初期き裂長さ、止端角、止端半径による疲れ寿命のばらつきはほとんどみられなかった。

参考文献

- Engesvik, K.M.: Analysis of Uncertainties in the Fatigue Capacity of Welded Joints, Report UR-82-17, The Norwegian Institute of Technology, 1981.
- ECCS: Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures, 1985.
- 田垣徳幸, 近藤明雅, 山田健太郎, 菊池洋一: 溶接継手の疲労寿命に与える隅肉溶接止端部形状の影響, 土木学会論文報告集, 第 324号, 1982, pp.55-64.