

実働荷重下における疲労寿命の破壊力学的解析

名古屋大学工学部 学生員 ○篠田 泰藏

名古屋大学工学部 正 員 山田健太郎

1. はじめに

近年、実構造物において形状変化、溶接欠陥を内包する溶接継手部での疲労破壊発生が報告されている。実構造物では、同様な継手形状が数多く使われ、同じ様な応力を受けることが多い。従って1カ所亀裂が発生すると、それ以外の継手にも早晚亀裂が発生することが考えられる。このような状況下で次々に発生する疲労亀裂がどの様に進むかを掌握することは、維持管理計画に非常に重要である。

本研究では、リブ十字形隅肉溶接継手を解析モデルとして破壊力学的手法を用い、実際に生じるであろうと思われる初期条件や荷重条件にばらつきを与えて疲労亀裂進展寿命解析を行い考察を加えた。

2. 数値シミュレーションによる疲労損傷程度の予測

2.1 破壊力学を用いた疲労損傷解析手法の概要

破壊力学を用いた疲労寿命予測は、亀裂進展速度式を積分することによって行われる。本解析では、(1)式を用い、初期亀裂発生時以降から部材が不安定破壊に移行する最終亀裂に至るまでの荷重繰り返し回数を疲労寿命 N として考えた。

$$da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m), \quad \Delta K = \sigma_r \sqrt{\pi a} \cdot F_s \cdot F_o \cdot F_t \cdot F_g \quad (1)$$

(1)式において、 m, C ; 材料定数、 ΔK ; 応力拡大係数範囲($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)、 ΔK_{th} ; 応力拡大係数範囲のしきい値($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) ($\Delta K > \Delta K_{th}$ の時亀裂が進展する)、 σ_r ; 応力範囲(MPa) (最大、最小応力の差)、 a ; 亀裂長(mm)、 F_s ; 自由表面補正係数、 F_o ; 亀裂形状補正係数、 F_t ; 有限板厚幅補正係数、 F_g ; 幾何学形状補正係数である。

2.2 数値シミュレーションに用いる溶接継手モデルとその特性

本解析に用いる溶接継手モデルは、Fig.1に示すリブ十字形隅肉溶接継手とした。¹⁾この継手では、亀裂はFig.1に示す様に半楕円形状で、溶接止端部から主応力に垂直に主板を貫通する方向へ進展し、その影響因子である初期亀裂長 a_0 、止端角 θ 、止端半径 ρ 、亀裂形状 a/b は、Engesvik、田垣ら、Albrechtらの収集データを用いて以下のように対数正規分布で仮定した。²⁾

(a)初期亀裂長 a_0 (mm): 平均=-2.143(0.12mm)、標準偏差=0.356、 $0.07\text{mm} \leq a_0 \leq 0.40\text{mm}$

(b)止端角 θ (°): 平均=3.62(37°)、標準偏差=0.29、 $20^\circ < \theta < 65^\circ$

(c)止端半径 ρ (mm): 平均=-1.10(0.33mm)、標準偏差=0.86、 $\rho < 3.0\text{mm}$

(d)初期亀裂形状 $(a/b)_0$: 平均=-1.01(0.36)、標準偏差=0.40、 $0.14 \leq (a/b)_0 \leq 0.73$

モデルの材質としてはSM50B材を考え、(1)式中の C, m は科学技術庁金属材料技術研究所において求められた $C=9.69 \times 10^{-9}$ 、 $m=2.9$ 、 $\Delta K_{th}=2.5 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を用い、板厚 t は10mm、最終亀裂長 a_f は8.5mmとした。また数値シミュレーションは、(1)応力範囲を一定とし亀裂進展に関与するパラメータにばらつきを与えた場合、(2)応力範囲に一樣な分布を与え亀裂進展に関与するパラメータにばらつきを与えた場合、の2種類について行った。各々シミュレーション回数を1000回としたのは実鋼構造物において、同じ種類の溶接継手が何箇所にもわたって使用される事をモデル化したものである。

3. 数値シミュレーション結果及び考察

(1) 応力範囲を一定($\sigma_r=120 \text{MPa}$)とし亀裂進展に関与するパラメータにばらつきを与えた場合の数値シミュレーション結果をFig.2,3に示す。

Fig.2は、解析結果をS-N線図(縦軸に応力範囲、横軸に荷重繰り返し回数)に示したもので、ECCSが定めたリブ十字形隅肉溶接継手に対する設計S-N曲線を比較のため図中に示す。今回の数値シミュレーション結果で

は、ECCSの設計S-N曲線より破断の早いものもみられる。

またFig.3は目視で発見できる亀裂長($a_d=1.5\text{mm}$)を考慮してヒストグラムで、疲労寿命までの途中段階のNにおけるaの分布を示したものである。最初に亀裂が発見されてから約 1.5×10^5 回の荷重繰返し载荷後に初めての最終亀裂が発生し、その後約 7×10^5 回荷重載荷後に全ての亀裂が a_r に到達することが分かる。

実構造物では、亀裂が相当大きくなって発見されることが多い。例えばリブ十字形隅肉溶接継手では、亀裂の板厚貫通に相当する。実際には、複数個の最終亀裂が発見されて初めて目視点検などが行われ、その際に a_d 以上の亀裂の存在が確認される。この状況を想定して、全部材(ここでは仮に1000個)の約5%が最終亀裂に達したとき目視検査を実施したとすると、 $a \geq a_d$ なる亀裂の存在する割合は既に約86%程度に及んでいる。

(2) 応力範囲に一樣な分布($\sigma_r=72 \sim 120\text{MPa}$)を与え亀裂進展に關与するパラメータにばらつきを与えた場合の数値シミュレーション結果をFig.4に示す。ここで σ_r に一樣分布を持たせたのは、実構造物では同様に設計された部材でも作用する応力の大きさが部材によって異なる事を反映させるためである。

Fig.4では亀裂の分布形状の2極化が認められ、 $N=10^5$ 回までに a_0 から a_r に至るなだらかな分布形状が発生した後、 a_r に至る亀裂と著しく進展の遅い亀裂とに分かれる。大半の亀裂が $N=10^7$ 回には、 a_r に到達しており、亀裂が発見されてから最初の最終亀裂が発生するまでの荷重繰返し回数は約 2.5×10^5 回で、その後約 3.5×10^6 回で約95%強の亀裂が a_r に到達するが、残り約5%弱の亀裂には進展がみられない。

また、(1)と同様、約5%程度の部材が最終亀裂長が達しているとき、特別な検査を行って発見できる亀裂の割合は約37%であり、(1)で示した場合の約2/5程度である。

4. まとめ

以上の結果より、破壊力学を用いた疲労寿命予測での荷重条件の重要性、及び影響の程度が把握できた。実際の亀裂発見の見地からは、亀裂の検査における亀裂の発見個数の推定が可能であることを示し、点検・補修・補強の計画に数値的なバックグラウンドを与え得るものと思われる。

今後の方針としては、実鋼構造物別に働く実働荷重の特性を明らかにし、その荷重特性を反映させた解析を行いたい。

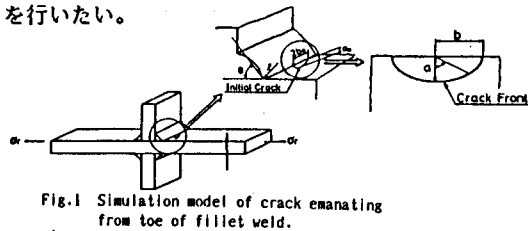


Fig.1 Simulation model of crack emanating from toe of fillet weld.

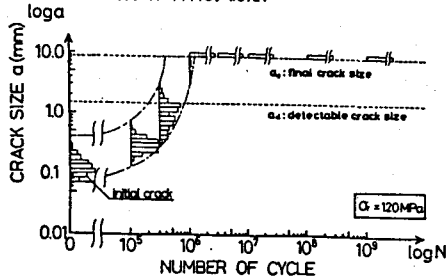


Fig.3 Scatter of fatigue crack sizes at various number of cycles. Stress range is fixed at constant value.

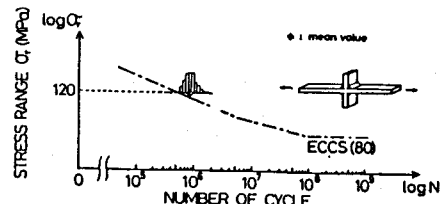


Fig.2 Scatter range of computed fatigue crack propagation life and comparison with ECCS design curve.

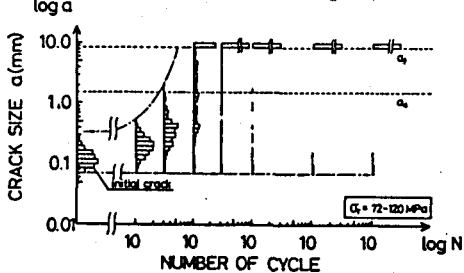


Fig.4 scatter of fatigue crack sizes at various number of cycles. Stress range varies uniformly from 60% to 100%.

参考文献

- 1) 山田健太郎, 牧野時則, 菊池洋一: 横リブ十字隅肉溶接止端部に発生する疲労亀裂の解析, 土木学会論文報告集, 第292号, 1979, pp. 1-12.
- 2) 永津省吾, 他: 破壊力学による溶接継手の疲れ寿命のばらつきの評価, 構造工学論文集, Vol. 34A (1988年3月)