

名古屋大学 正会員 山田健太郎

名古屋大学 学生員 牧野時則

名古屋大学 正会員 菊池洋一

1. まえがき 破壊力学では、き裂の先端の力学的性質を、応力拡大係数で示して、割れによって破壊する構造部材の強度を、工学的に推定する。これは、疲労き裂の進展の解析にも、いわゆる Paris の実験式を用いて応用されている。ここではリブ十字すみ肉溶接継手に、変動ブロック荷重をかけた場合の疲労試験結果と、とくにその疲労き裂の進展に注目した解析について述べる。

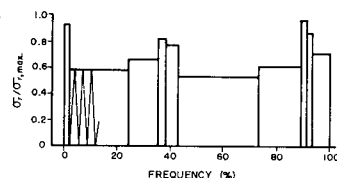
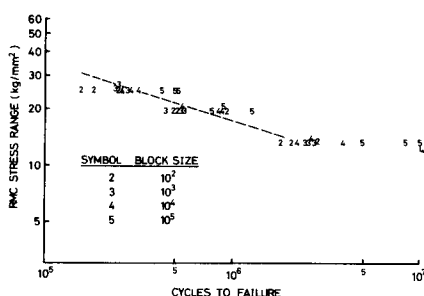


図1. 変動ブロック応力

2. 実験 実験では、リブ十字すみ肉溶接継手(図4)に対して、図1に示す基本形に3個の最大応力振幅 $\sigma_{T,max}$ (21.1, 30.9, 39.4 kg/mm²) を束ねて得られる変動ブロック応力を載荷した。また、ブロック内くり返し数は、 $10^2, 10^3, 10^4, 10^5$ 回と変化させてその影響を観察した。試験は、応力レベルとくり返し数の組合せの合計12個に対して、各3本ずつ、合計36本について行なった。材料は、ASTM A588 である。

図2. 等価応力 $\sigma_{e,RMC}$ で整理した疲労試験結果

3. 結果 試験片が破断するまでの疲労寿命と、各変 応力レベルを、式(1)で計算される等価応力(RMC, 三乗平均応力)で整理したものを、図2に示す。

$$\sigma_{e,RMC} = \left(\frac{\sum n_i \sigma_i^3}{N} \right)^{1/3} \quad (1)$$

図中の破線は、同じ試験片12本で行った定応力振幅での平均疲労寿命であり、式(1)を用いた場合の予想疲労寿命は、変動ブロック内くり返し数が増加すると長くなる傾向にある。この関係をさらに、各応力レベルの平均疲労寿命の対数平均値を、式(1)で予想される疲労寿命 N_{exp} で無次元化して示したものが図3であり、上述の結果をうけている。

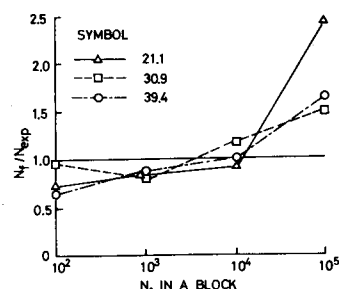


図3. ブロック内くり返し数の影響

この試験の特徴の一つは、疲労試験の途中で、溶接止端部に切削用塗料(商品名 Shell Blue)を塗布して、その時点で発生している疲労き裂にマーキングすることを試みたことである。疲労試験のどの段階で塗布するかは、完全な試行錯誤であるが、図4に示すように、この試験片では、疲労寿命の約40%以後に塗布した場合、0.5mm 程度の深さの半円形およびギョーデル形のき裂がマークできた。このき裂の形、すなわち、き裂深さ a と、き裂の幅 b と

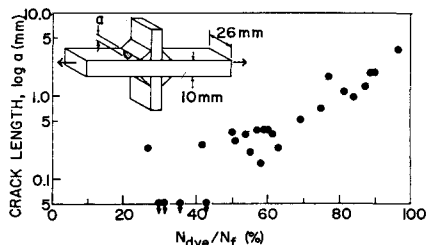


図4. き裂の大きさとマーキングの時期

を面対数軸上にプロットすると、図5のようになる。このマーキングの時点から試験片が破断するまでの寿命は、疲労き裂の進展寿命の一部であり、後述する破壊力学による疲労き裂進展の解析の対象になる。また図4中、矢

印を付した試験片では、その時点ではき裂が存在していなく、したがってマーキングも残らなかった。このことから、この試験片では、解析可能なき裂は、全寿命の50%程度の疲労の後、発生したと考えられる。

4. 解析 破壊力学を用いて疲労き裂の進展寿命を解析するためには、応力拡大係数 K と、き裂の進展速度 da/dN に関する実験式が必要である。リブ十字すみ肉溶接止端部の応力集中を考慮した場合の K の解析は、文献2に述べられており、ここでは、次式を用いる。

$$\Delta K = \frac{1.12}{E_k} \cdot F_g \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \sqrt{\frac{2t}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2t}} \quad (2)$$

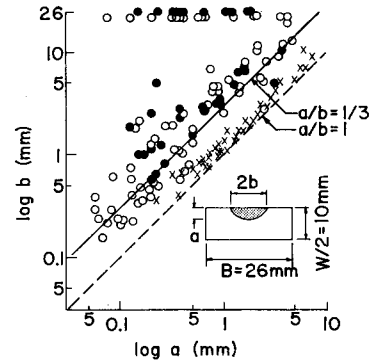


図5. き裂の形状の測定値

ここで、1.12は、き裂が表面に出ていることの補正係数、 E_k は、円形き裂に対する補正係数、 F_g は、応力集中を考慮した補正係数、 $\sqrt{\frac{2t}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2t}}$ は、有限板厚に対する補正係数である。また、き裂の進展速度式 da/dN (mm/cycle)は、応力拡大係数の範囲 ΔK ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$)を用いて次のように表わされるものとする。

$$\frac{da}{dN} = 1.43 \times 10^{-10} (\Delta K)^{3.0} \quad (3)$$

図1に示す変 応力が作用する場合のき裂の進展は、式(2)と式(3)に代入して下式の微分方程式を、き裂の大きさ a についてRunge-Kutta法等で数値解析して求める。図6には、解析結果を、き裂の大きさと縦軸に、7つ大きさから破断までの残存寿命を横軸にプロットした、残存寿命曲線を示す。

図中、ハッチで示した部分の上限は、き裂を半円形($a/b = 1/3$ 、一定)と想定した場合に相当し、下限は、半トノネル形($a/b = 0$)と想定した場合であり、それぞれ図5に示すき裂形状の測定値より仮定した。

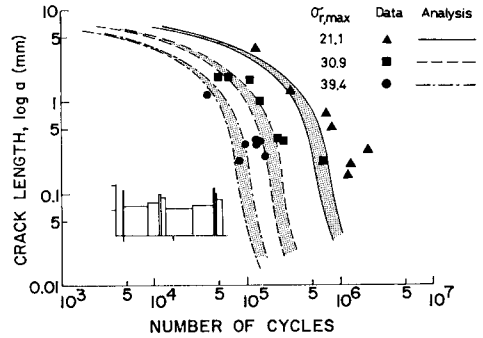


図6. 残存寿命曲線の計算値と実験値の比較

図6には、前述のマーキングにより得られたき裂の大きさと、残存寿命の測定値を、各応力レベルについて記号を変えて示している。データは、ばらつきがあるものの、き裂進展寿命の5万回から200万回にわたって、解析結果と良好な一致がみられている。クラックの進展寿命の測定値を、 $a/b = 1/3$ と想定した場合の計算値と比較したものが、図7であり、上述の結果をうすけている。

5. 結論 リブ十字すみ肉溶接止端部に発生する疲労き裂をマーキングすることにより、その進展寿命の一部を分離することができ、このき裂の進展寿命は、破壊力学を用いた解析が可能であり、比較的簡単な仮定のもとでの計算結果とよく一致した。なお、本実験は、米国 Maryland 大学の P. Albrecht 教授のもとで共同研究したものである。

【参考文献】 1. Abtali, A., Albrecht, P. and Irwin, G.R. "Fatigue of Periodically Overloaded Stiffener Detail". Proc. of ASCE, Vol. 102, ST11, Nov. 1976. 2. Albrecht, P. and Yamada, K. "Rapid Calculation of Stress Intensity Factors". Proc. of ASCE, Vol. 103, ST2, Feb. 1977.

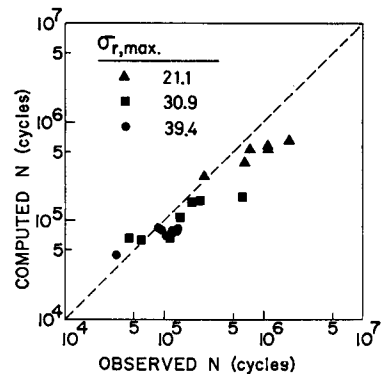


図7. き裂進展寿命の計算値と実験値の比較