引張残留応力場に圧縮の繰返し応力が作用する場合の応力拡大係数の試算

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋　正会員　○山田健太郎

１．はじめに

繰返し荷重を受ける溶接継手の疲労き裂の進展挙動は、残留応力場の影響を受ける。例えば、引張の繰返し応力を受ける溶接継手の疲労き裂発生点に高い圧縮残留応力を導入すると疲労き裂の発生、進展を抑えることができる。この原理を利用した UIT や ICR 処理などの疲労強度向上法がある[3]。

圧縮の繰返し応力をうける溶接継手では、溶接による引張残留応力の影響で、その部分から疲労き裂が生じることがある。繰返し応力が圧縮側でも、残留応力の影響で引張側の繰返し応力になるのがその理由である。その場合、疲労き裂の進展挙動を計算するためには、引張残留応力場に圧縮の繰返し応力が作用した場合の応力拡大係数範囲 ΔK を計算する必要がある。ここでは、残留応力の影響を考慮する補正係数 F_{RS} を試算してみる。

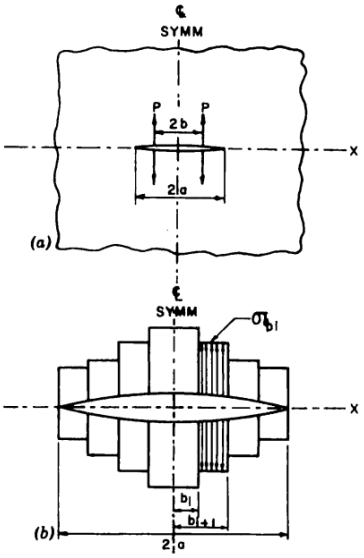

図１　K 値の補正係数の計算方法[1]

２．計算の仮定と計算式

破壊力学を用いた疲労き裂進展解析では、応力拡大係数範囲 ΔK で定義された疲労き裂進展速度式 da/dN 用いて、き裂を初期き裂 a_0 から最終き裂 a_f まで進展させる繰返し数 N_p を求める。ΔK は、指針類[2]に式が示されるが、そのままでは残留応力の影響を考慮する場合には適用が難しい。ここでは、図１a に示す Griffith き裂の表面に一対の集中荷重 P が作用する場合の K 値の理論式(式 1)を用いて、残留応力場での K 値を求めることを試みる。集中荷重 P を微小部分の応力に置換して積分の形に変換し、さらに、式 2 のように区分積分の形に変換することで、任意の応力分布に対する K 値を求めることができる[1]。これは、文献 1)で応力集中補正係数 F_g を求めた考え方と同じである。ここでは、残留応力の影響を考慮した係数として、式 2 に示すように F_{RS} と定義する。

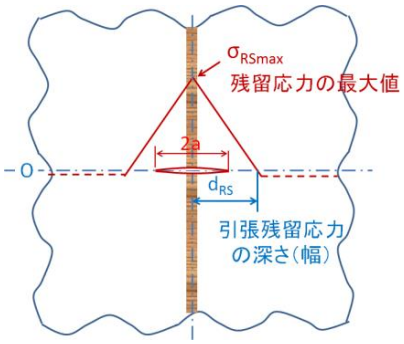

図２　Griffith き裂と残留応力の仮定

$$K = \frac{2P}{\sqrt{\pi a}} \frac{a}{\sqrt{a^2-b^2}} \quad \cdots式\,1 \qquad F_{RS} = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{n} \frac{\sigma_{b_i}}{\sigma} \left(arcsin \frac{b_{i+1}}{a} - arcsin \frac{b_i}{a} \right) \quad \cdots式\,2$$

例えば、図 2 に示す平板の中央に長さ 2a のき裂のある Griffith き裂に、溶接による引張残留応力が存在するモデルを考える。残留応力は、最大値 σ_{RSmax} とその広がり $2d_{RS}$ の三角形分布で仮定する。外力が作用しない場合（作用応力=0）、部材には初期応力として残留応力分布が存在する。まず、引張の外力（例えば、σ=150MPa）が作用すると、残留応力と外力による応力の和が最大応力の分布となる。これを疲労き裂の進展に寄与する Δσ で見ると、ほぼすべての応力範囲 Δσ が正で一定の値になる。すなわち、Δσ が一定の Griffith き裂の K 値と同じとなり、F_{RS}＝1 となる。

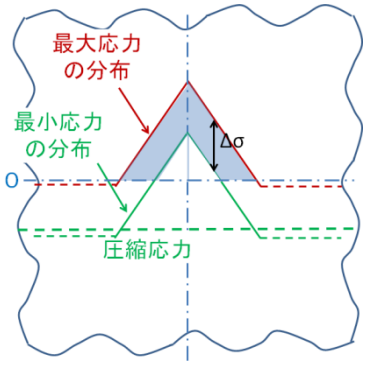

図３　残留応力場での応力範囲

圧縮の外力が作用する場合は、様相が異なる。まず、作用応力=0 では、初期の残留応力分布となる。そこに圧縮の外力（例えば σ＝－150MPa）が作用すると、これが最小応力の分布となる。図 3 の影で示すように、引張残留応力が存在する部分では、その分だけ最小応力が大きくなる。

キーワード　応力拡大係数、引張、圧縮、曲げ、残留応力、補正係数

連絡先　〒460-0003　名古屋市中区錦 1-8-11　中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）ＴＥＬ052-212-4577

さらに、疲労き裂はき裂が開口する時、すなわち K＞0 のときに進展する。K 値が負の場合には、疲労き裂進展に寄与しないことを考慮して、ΔK、あるいは F_{RS} を計算する必要がある。

3. 中央き裂（Griffith き裂）の計算の例

図 2 に示す Griffith き裂に、最大値 σ_{RSmax}=180MPa の残留応力が存在すると仮定する。その幅 $2d_{RS}$ は、20、40、60mm とする。作用応力は、最大値 0、最小値 σ =－150MPa（圧縮片振り）とする。き裂長さ a を変えて、残留応力の影響を考慮した F_{RS} を計算した結果を図 4 に示す。ここで、横軸には a、縦軸には F_{RS} を示す。この F_{RS} の値は、残留応力と作用応力の関数となるので、文献 1)で示される補正係数 Fg とは意味が少し異なる。

この結果を見ると、き裂が小さい時には引張を受ける Griffith き裂と同じく、F_{RS} ＝1 となる。き裂が大きくなると、引張残留応力が小さくなり、圧縮応力の割合が大きくなるので、疲労き裂進展に有効な Δ σ が小さくなり、結果として F_{RS} が減少する。仮定した σ_{RSmax} や圧縮応力にもよるが、d_{RS} の 1.5 倍あたり、例えば d_{RS}=10mm のとき、a=15mm 程度で F_{RS} は 0 となる。すなわち、疲労き裂進展は、このあたりで停留することが想定される。

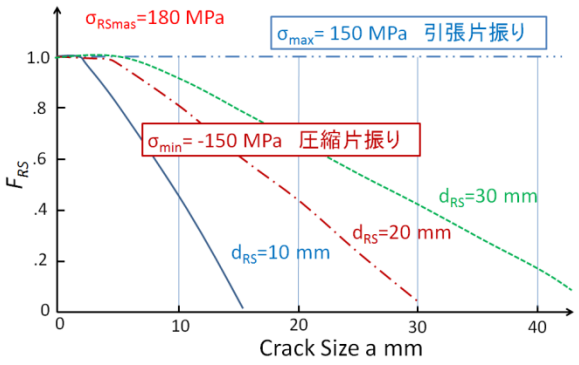

図 4 残留応力の形を変えたときの F_{RS} の値

4. 引張と曲げを受ける片側き裂（edge き裂）の計算の例

外力として引張応力を受ける片側き裂の場合に、残留応力が存在しない場合は、Griffith き裂の場合と同様に計算できる。それに図 5 に実線で示す自由表面の補正係数 F_s と、板厚（板幅）の補正係数 F_t を乗じた値で示すことができる [1]。外力が圧縮応力の場合は、K<0 となるので、基本的に疲労き裂は進展しない。引張の残留応力が作用する場合は、Griffith き裂と同様に、F_{RS} が計算できる。

片側き裂では、曲げモーメントが作用する場合がある。き裂近傍に正の曲げモーメント（引張片振り）が作用する場合は、Griffith き裂と同様に曲げ応力をき裂表面に作用させて K 値が計算できる。曲げモーメントが負（圧縮片振り）の場合、K<0 となり、疲労き裂は進展しない。そこに K>0 となるような引張残留応力が存在すると、疲労き裂が進展することになる。その場合の最大応力と最小応力の分布、および応力範囲の正の部分を模式的に図 5 に示す。この応力分布を用いて、曲げモーメントを受ける片側き裂の残留応力の影響を考慮する F_{RS} が計算できる。

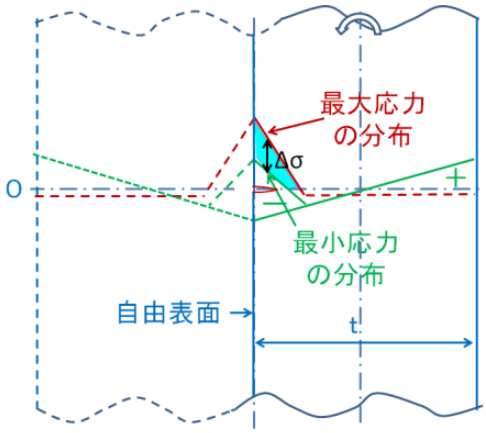

図 5 曲げモーメントを受ける片側き裂の F_{RS} の解析モデル

5. まとめ

一対の集中荷重がき裂表面に作用する場合の K 値の理論式を用いて、残留応力場での K 値の計算方法について考察した。また、引張残留応力が存在する場合の K 値の補正係数を F_{RS} と定義した。この F_{RS} は、例えば溶接による引張残留応力の存在下での疲労き裂進展の挙動のうち、特に作用応力が圧縮片振りになる場合の疲労き裂の進展挙動の計算に用いることができる。

参考文献

1) Albrecht, P. and Yamada, K.: Rapid calculation of stress intensity factors, *Journal of the Structural Division*, Proc. of ASCE, Vol.103, No.ST2, pp.377-389, 1977.

2) 例えば、日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説-2012 年改訂版-，技報堂出版，2012.

3) 石川敏之，山田健太郎，柿市拓巳，李薈：ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果，土木学会論文集 A，Vol.66, No.2，pp.264-272，2010.