

1. まえがき 鋼構造物に通過交通・風・波浪等起因する不規則な外乱が作用すると、その継手部には変動応力が生じる。その作用応力が大きいと、継手部には疲労き裂が発生し、それが進展して破断に至る。このような変動応力による疲労寿命の推定法として、Miner 則や等価応力振幅法がある。これらは、変動応力による疲労試験結果の特性をうまく説明し、なおかつ取り扱いが容易であることから、疲労設計法にも採用されている。ところが、図1に示すように、応力分布の大半が、いわゆるその継手の疲労限 σ_F 以下になる場合の実験例は少ない。これは、疲労に余り関係しない応力分布を多数含み、疲労試験に時間がかかるため、実験的な検証が難しいためであろう。現実には、少数ではあるが高い応力が疲労き裂を発生・進展させるので、疲労の経過とともに、低い応力も疲労き裂の進展に寄与することが懸念される。したがって、何らかの方法でこの領域の変動荷重による疲労寿命の検討をする必要がある。

そこで、本論文では、疲労限以下のくり返し数が支配的な応力分布が作用する継手の N_p を、破壊力学の手法を用いて計算する方法を示す。これは、高い応力集中や初期欠陥が存在し、疲労の初期からき裂が進展するような溶接継手の解析法として有効であると思われる。

2. 解析の手法 破壊力学による N_p の計算では、き裂の特性を定義する応力拡大係数範囲 $\Delta K = F(a) \cdot \sigma_F \sqrt{\pi a}$ と、その材料のもつ疲労き裂進展速度式 $da/dN = C(\Delta K)^m$ を用いる。変動荷重が作用する場合には、 ΔK を da/dN 式に代入してできる1階の常微分方程式を、き裂長 a について解けば良い。溶接継手の N_p の計算の流れを示すと、つまのようになる。

① 破面観察や欠陥の調査により、その継手に存在すると予想される初期き裂長 a_0 を想定する。この場合、過去に蓄積された定応力振幅疲労試験データ ($\sigma_F - N_f$ 線図) ももとに、それと同じ寿命を与える a_0 、すなわち等価初期き裂長 $a_{0,eq}$ を求めて、変動荷重による N_p を計算する際の初期値とすることも可能であろう。(図2)

② 変動応力分布を与える。これには、実測された応力分布や、モデル化した応力分布を用いる。

③ a_0 または $a_{0,eq}$ から最終き裂長 a_f までの N_p を計算する。この場合、 da/dN 式とともに、 da/dN の下限界値 (ΔK_{th} , threshold stress intensity factor range) を考慮する必要がある。これは、 ΔK を小さくしてゆくと、 da/dN が事実上零になる(き裂が停滞する)点が存在するという実験に基づいている。したがって、 $\Delta K > \Delta K_{th}$ では、 $da/dN = C(\Delta K)^m$ と、 $\Delta K \leq \Delta K_{th}$ では $da/dN = 0$ (き裂は進展しない) を与えて N_p を計算し、変動応力の分布の中で低い応力による“疲労被害”の程度を評価する。この考え方を解析に導入すると、き裂進展に従って低い応力でもき裂進展に寄与する(疲労被害を与える)ことになり、現実と

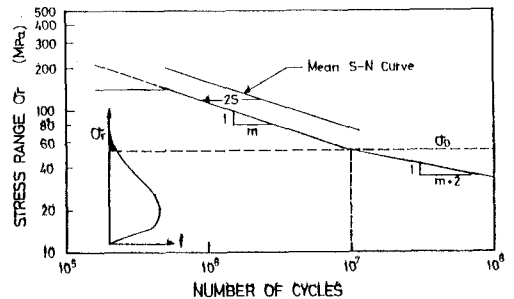


図1 変動荷重を受ける部材の疲労設計に用いる S-N 線図の例

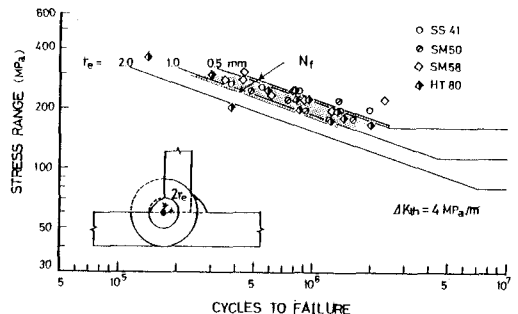


図2 溶接析出フローホール、スラック巻込など、溶接欠陥から疲労き裂が発生すると考えた場合の $\sigma_F - N_f$ 線図と実験値との比較

一致する。なお、作用応力振幅 σ_r が一定であれば、 $\sigma_r = \Delta K_{Ic} / (F(a) \cdot \sqrt{\pi a})$ を用いて、与えられた a_0 ないしは $a_{0,eq}$ を用いて、疲労限 σ_D に相当する応力も計算することができる。(図2)

④ 以上は、あくまで解析的な手法であるが、実験データなども参考にしながら、各パラメータの影響などを評価することも可能である。

上述の解析法に従って、溶接部の縦ヒートすみ肉溶接部に変動荷重が作用した場合の N_p を計算する。

3. 解析例 溶接部では、縦ヒートすみ肉溶接部に存在するスラグ巻込みやフローホール等の欠陥からき裂が進展することがある。このき裂は、いわゆる penny shape き裂として円形に進展してゆくと言われており、応力拡大係数範囲は、 $\Delta K = 2/\pi \cdot \sigma_r \sqrt{\pi a}$ と定義される。このき裂形状は、き裂の一端がフランジの板厚を貫通するまで円形が保たれると考えて良いだろう。Hirata によれば、溶接部の疲労破面観察から、平均半径 $r_e = 1 \text{ mm}$ で、 0.5 mm から 2 mm 程度までばらつく等価初期き裂が得られている。これは、種々の形状をもつフローホールやスラグ巻込みなどの溶接欠陥を、外挿するまで円形き裂で近似し、それと ΔK が等価な円形のき裂に換算して求めたものである。(図2) 同様な溶接部の疲労寿命と比較しても、 $r_e = 2 \text{ mm}$ の初期き裂が存在すると考えた場合の N_p が、疲労寿命の下限値をあたえているようである。

そこで、図4では、 $a_{0,eq} = 2 \text{ mm}$ と仮定し、変動応力分布が図3のように与えられた場合の N_p を計算してプロットした。この作用応力分布は、 β 分布を用いて作り、① 低い応力が主体の分布、② 比較的低い応力のくり返し数が多い分布、③ 比較的高い応力が主体の分布、になっている。図4の縦軸は、変動応力を式次で計算される等価応力分布に変換したもので、 σ_r - N_f 線図の傾き $m=3$ の場合の Miner 則と同じ式である。

$$\sigma_{r,eq} = \left(\frac{\sum \alpha_i \sigma_{ri}^3}{N} \right)^{1/3}$$

$\Delta K_{Ic} = 0$ と考えた場合には、直線被害則と同じとなり、上述の解析結果は、傾き $m=3$ の σ_r - N_p 線図の延長上にプロットされる。本解析例では、き裂が小さい内に小さな応力振幅が作用した場合(すなわち $\Delta K < \Delta K_{Ic}$ の状態)では、き裂が進展せず、 N_p の計算値はいずれも直線被害則より長くなっている。その程度は、応力分布形によって異なり、図4では、図3の分布形 ①、②、③、の順に N_p が長くなっている。これは、 $\sigma_{r,eq}$ で計算値をプロットしたためで、応力分布の σ_r の最大値を同一にすると、低い応力を多く含む分だけ ① の分布が長い寿命を示すことになる。

4. まとめ このように、破壊力学によって変動荷重による疲労き裂進展寿命をパラメトリックに計算し、Miner 則などとの比較に用いることができる。今後の検討課題として、(1)、多種多様な継手の a_0 または $a_{0,eq}$ の調査、(2) ΔK_{Ic} の値、(3) 荷重または応力分布形の調査 (4) Interaction effect の検討、(5) 各パラメータのばらつき等を含めた確率論的な考察、などが必要と思われる。

[文献省略]

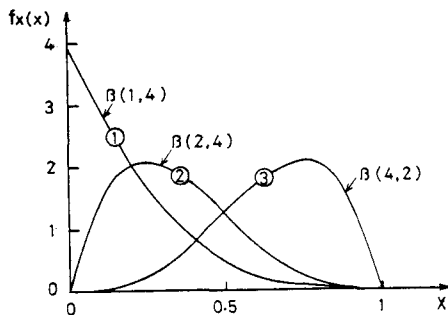


図3 標準ベータ分布を用いた応力ひん度分布のモデル

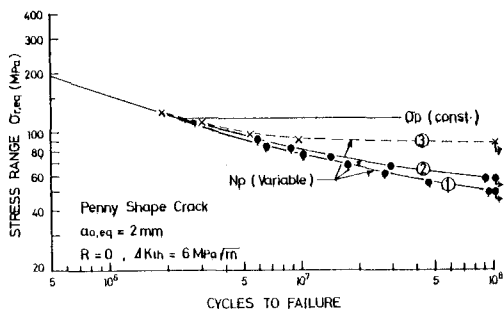


図4 変動応力分布をベータ関数で定義し、 $\sigma_{r,eq}$ で代表させた場合の N_p の計算値