

大阪大学大学院 学生員 ○趙 相明
大阪大学溶接工学研究所 正員 堀川浩甫

1. 緒言

溶接構造物の疲労設計は継手の応力集中度の度合によって決まる許容応力を用いて行う場合が多い。ところが構造的応力集中部に溶接継手が存在するときは、その応力集中部（以下、切欠き）の弾性応力集中係数 K_t と応力範囲などで算定される疲労損傷パラメータを用いて疲労寿命を評価することができる。ここでは、切欠き先端近傍において、疲労き裂の伝播がある程度までは許容されると想定し、切欠き材の疲労損傷パラメータと疲労寿命の関係に及ぼす切欠き形状の影響を実験によって検討した。さらに、切欠き先端に存在するき裂状の初期欠陥の疲労寿命に及ぼす影響を検討するために、き裂の初期伝播寿命についても実験結果及びき裂の伝播則を用いて考察を加えた。

2. 実験方法

供試材HT80及びSS41の平滑材（板厚5.5mm,全幅10mm）を用いてひずみ制御疲労試験（ $R_\epsilon = -1$ ）を行って各供試材の寿命曲線を求めた。また、HT80については曲率半径 $\rho = 2.5\text{mm}$ の円孔切欠き（ $K_t = 2.7$ ）と長軸5.0mm、 $\rho = 0.25\text{mm}$ の楕円孔切欠き（ $K_t = 6.0$ ）を導入した2種類の中央切欠き材（板厚5.0mm,全幅38.0mm）に対する荷重制御疲労試験（ $R_\sigma = -1$ ）を行って、き裂の発生と初期伝播挙動を調べた。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 はひずみ制御疲労試験による平滑材の破断寿命を示したものである。縦軸の応力範囲は、切欠き材の疲労損傷パラメータとの対応性を考慮して、3つの方法で求めた値である。すなわち、全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon \times$ 弾性係数 E による値（ $E \Delta \epsilon$ ）、 $\sqrt{E \Delta \epsilon \Delta \sigma} = P_{SWT}$ の値、そして実測の応力範囲 $\Delta \sigma$ がそれぞれである。このような関係を直線に近似させ、その傾き m を各々 m_ϵ 、 m_P 、 m_σ としてTable 1 にそれらの値を示す。

Fig.2 はHT80の両切欠き材に対する実験結果で、縦軸は切欠き先端のひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{tip} \times E$ の値とした。太い実線は平滑材の $E \Delta \epsilon$ の傾向である。き裂の長さ $a = 0.1\text{mm}$ までの繰返し数 $N_{0.1}$ 及び $a = 2.5\text{mm}$ までの繰返し数 $N_{2.5}$ を同時に図示した。Fig.3 はFig.2 と同じ実験結果を、 $P_{SWT} = K_t \cdot \Delta \sigma_{net}$ （ σ_{net} : 正味断面応力）で整理したものである。この疲労損傷パラメータ P_{SWT} は平滑材では $\sqrt{E \Delta \epsilon \Delta \sigma}$ となるがNeuber則を適用すると切欠き材では $K_t \Delta \sigma_{net}$ となる。Fig.3 でも $N_{0.1}$ 及び $N_{2.5}$ を一緒に図示した。このようなFig.2 及びFig.3 において $N_{0.1}$ は平滑材の破断寿命とほぼ同様な傾向を示すことが分かる。すなわち疲労き裂発生寿命とも言える $N_{0.1}$ は1つの疲労損傷パラメータである $E \Delta \epsilon_{tip}$ あるいは P_{SWT} を用いて評価しても切欠き形状の影響をそれほど受けないようである。しかし、 $N_{2.5}$ の場合は円孔と楕円孔切欠き材においてその疲労損傷パラメータが同じであっても、応力の勾配が大きい楕円孔切欠き

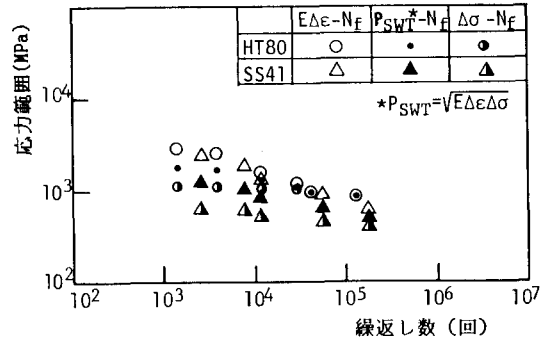


図1. ひずみ制御疲労試験による平滑材の破断寿命

表1. 平滑材の疲労破断寿命曲線の傾き m

材料	m_ϵ	m_P	m_σ
HT80	-0.299	-0.176	-0.053
SS41	-0.328	-0.222	-0.116

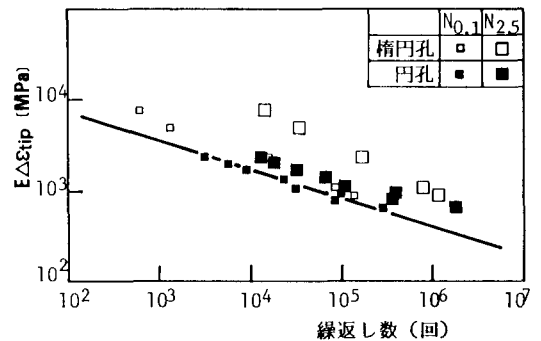


図2. 切欠き材の $E \Delta \epsilon_{tip}$ と疲労寿命

材の方がかなり高寿命側に寄っていることが分かる。このことから、ある一点での疲労損傷パラメータを利用しただけでは相当なき裂伝播寿命が含まれる $N_{2.5}$ のような疲労寿命までは評価し難いものと考えられる。特に切欠き先端に存在するき裂状の初期欠陥の疲労寿命に及ぼす影響を評価するためには、破壊力学を適用してその伝播特性を把握する必要がある。そこで $a=2.5$ mmまでのき裂伝播寿命を弾性破壊力学の適用によって推定し、さらにその傾向と実験結果との比較を試みた。

Fig.4 は楕円孔切欠き材においてき裂がないと仮定して求めた疲労損傷パラメータ $E\Delta\epsilon_{tip}$ を縦軸に取り、初期き裂の長さ a_i を0.1, 1.0, 2.0 mmと変化させて $a=2.5$ mmまでの寿命を表わしたものである。一点鎖線が ΔK による予測値で、□、▲、○印が実験値である。ここで、HT80のき裂伝播則は同じ板より切り取った試験片を用いて($R\sigma=-1$) 求めた次式を使用した。

$$da/dn = 1.05 \times 10^{-9} (\Delta K^2 \cdot 93 - \Delta K_{th}^2 \cdot 93) \text{ mm/cycle}$$

ここで、 $\Delta K_{th}=11.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ で、応力拡大係数 K は解析解が得られてないので弾性有限要素法によって求めた。

Fig.5 は円孔切欠き材に対する同様な結果である。Fig.4 及びFig.5 より切欠き先端近傍にある疲労き裂の伝播寿命は ΔK によって概ね評価できるものと受け取られる。しかしながら、Fig.5 の円孔切欠き材において $a_i=0.1$ mmの場合（図中の口印）、応力レベルが高くなると予測寿命より実測寿命が低寿命側に寄っている。これは、初期き裂が切欠きそのものの塑性域の中を伝播するので、 $a=2.5$ mmの中に小規模降伏条件が満足されない領域が含まれているからであると解釈される。ところが、Fig.4 の楕円孔切欠き材の場合はこのような現象がそれほど著しくない。すなわち、曲率半径 ρ が円孔のそれより小さい楕円孔切欠き材においては、切欠き領域が小さく、小規模降伏条件が満足されない領域が、 $a=2.5$ mmの中で占める割合は比較的に小さいからであると考えられる。

4. 結言

- (1) 切欠き材においてき裂伝播寿命をほとんど含まないき裂発生寿命は、上記の疲労損傷パラメータを用いて評価するとき、切欠き形状の影響をそれほど受けない。
- (2) 疲労寿命がき裂の伝播寿命に依存する場合、疲労損傷パラメータと寿命との関係には切欠きの形状の影響が現われる。
- (3) 切欠き領域でのき裂伝播寿命が、疲労寿命の大部分を占め、応力が高いときは、 ΔK の適用だけでは正確な疲労寿命を評価し難い場合がある。

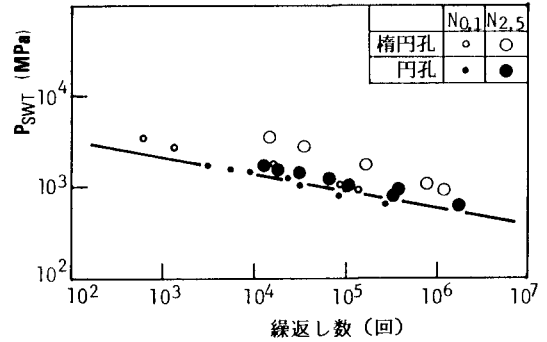


図3．切欠き材の P_{SWT} と疲労寿命

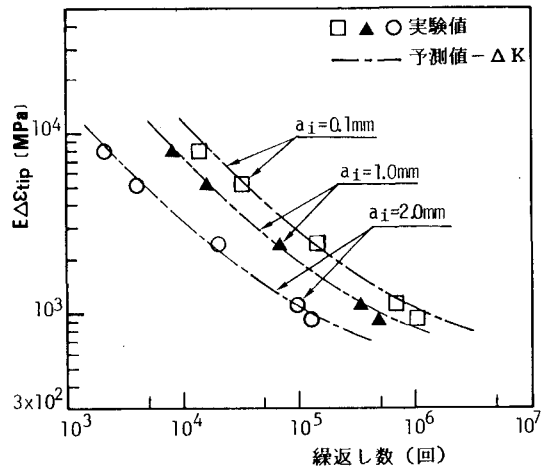


図4．楕円孔切欠き材の初期き裂長さ伝播寿命

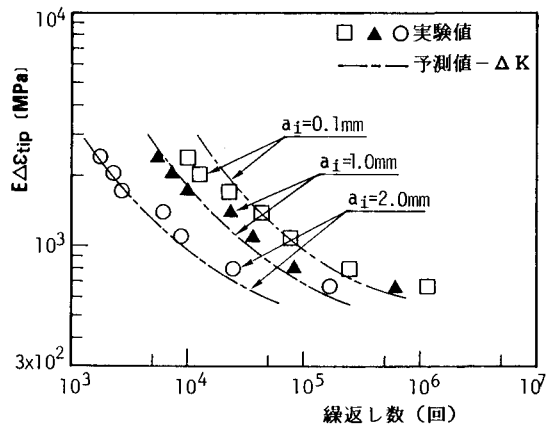


図5．円孔切欠き材の初期き裂長さ伝播寿命