

金属の疲労—破壊力学による破壊解析—

A

金属材料の疲労過程は、疲労亀裂の発生の段階と、その亀裂の進展・成長の段階とからなり、いわゆる寿命はこの両段階の寿命の和である。亀裂発生過程は不明な点も多いが、亀裂進展過程は破壊力学的な取扱いが極めて有効であり、鋼構造物の寿命評価では、材料の疲労亀裂進展速度を用いた評価法が積極的に取り入れられている。

ここでは、破壊過程の逆をたどることにより、破壊力学的解析法を利用して、亀裂進展寿命や、作用応力を評価することについて紹介する。

破壊解析の概要

A - 1

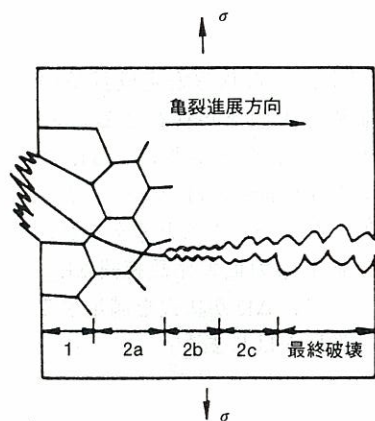
材料に繰返し荷重が作用し疲労破壊する過程は、微視亀裂の発生と進展に分けられる。微視亀裂はせん断応力が最大値をとるすべり面に沿って存在し、単軸負荷の場合、負荷応力の方向に対し 45° に方位する面である。繰返し負荷が継続すると、微視亀裂は成長する。亀裂長さの増加にともない、亀裂は 45° に近い方位のすべり面を離れ、応力軸に垂直に進展する。その様子は前報¹⁾で述べたとおり、模写的に第1図のように示される。この遷移は、第1段階（結晶学的進展）から第2

段階（非結晶学的進展）への遷移と呼ばれる。微視亀裂の発生源は、静的強度レベルが低い材料では、すべり帯内や結晶粒界、非金属介在物界面などであるが¹⁾、通常の機械部品や構造物の破壊では、一般に欠陥（材料欠陥、鑄造欠陥、鍛造欠陥、溶接欠陥）や高応力集中部（加工きず、溶接止端部）などとなる。そして、これらを起点として発生した亀裂が進展し、最終破壊にいたる場合が多い。

破壊力学は、亀裂や欠陥を有する部材の亀裂進展特性や、最終破壊などの強度特性を単一のパラメーターによって定量的に記述しようとする方法である。したがって破壊が生じた場合、破壊過程の逆をたどると同時に破壊力学による解析を行うことにより、作用応力や寿命などを推定することができる。

破壊力学パラメーターとしては、応力拡大係数 K 、亀裂先端開口変位CTOD、経路独立線積分 J などが用いられる。機械や構造物の破壊では、亀裂先端にできる塑性変形した領域（塑性域）が、亀裂の長さや、残りの断面の寸法に比べて、十分小さいという小規模降伏条件を満足していることが多いことや、取扱いが容易なことから、一般に破壊力学パラメーターとして応力拡大係数 K が用いられている。

1) 木下修司：こべるにくす, Vol. 2(1993) Apr., p. 1



第1図 疲労破壊過程の模式図

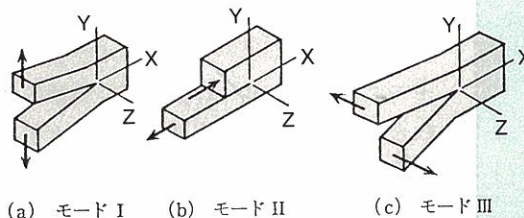
応力拡大係数

A - 2

亀裂に応力が負荷されている場合の亀裂面の変位様式は、第2図に示す通り、三つの基本的な型に分けて考えることができ、それぞれモードⅠ（開口型）、モードⅡ（面内せん断型）およびモードⅢ（面外せん断型）と呼ばれる。

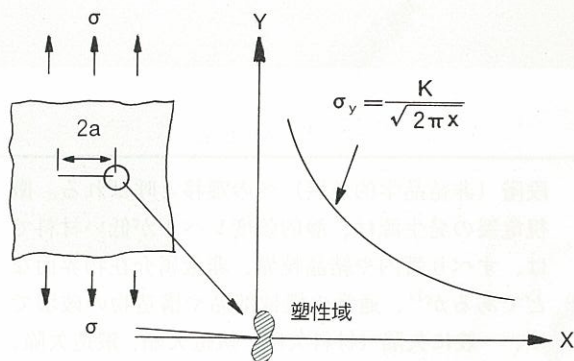
第1図に示した、すべり帯に沿う初期亀裂発生過程の第1段階は、モードⅡの変位様式であり、以下に述べる第2段階以降は、ほぼ完全なモードⅠの変位様式となる。

亀裂先端の曲率半径が0の鋭い亀裂を考える。



第2図 基本的な亀裂面の変位様式

第3図に示すように外力が負荷されると亀裂先端で非常に大きな応力集中が生じ、亀裂先端の材料は降伏するが、塑性域が亀裂長さに比べて十分小さい場合には、亀裂の延長線（x 軸）上における亀裂先端近傍の垂直方向（y 軸方向）弾性応力 σ_y は、



第3図 小規模降伏状態での亀裂先端近傍の弾性応力分布

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi x}} \quad (1)$$

で近似される。ここに係数 K は、次式であたえられる応力拡大係数と呼ばれるものである。

$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

σ は作用応力、 a は亀裂長さ、 α は部材や亀裂形状、負荷形式などで決まる定数である。 α は中央貫通亀裂の場合は、実亀裂長さの $1/2$ 、端部亀裂の場合は実亀裂長さとなる。いろいろの部材形状や負荷形式に対して応力拡大係数が計算されている²⁾。たとえば無限板中の板厚貫通亀裂の場合は $\alpha = 1$ で、板幅 w の帯板中の中央貫通亀裂の場合は $\alpha = \sqrt{\sec(\pi a/w)}$ となる。

(1)、(2)式より、 σ 、 a が異なる二つの別の試験片を考えた場合、(1)式での K が同じ値であれば、それぞれの試験片の亀裂先端近傍では、全く同じ弾性応力分布が生じることとなり、また塑性を支配していると考えられる塑性域内部の応力状態も同様であると考えられる。その意味において、実部材での現象を試験材で再現できることに破壊力学的取扱いの意義がある。

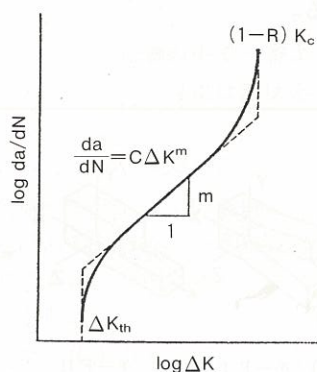
A - 3

疲労亀裂進展特性

Paris と Erdogan³⁾ は、形状の異なるアルミニウム合金の亀裂進展試験をした結果、 $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ ($K_{\min} < 0$ のときは $K_{\min} = 0$ とする) とすると、亀裂進展速度 da/dN (N は繰返し数) と ΔK は両対数線図上で1本の直線上にのり、 C および m を材料定数とした次式でよく近似できることを示した。

$$da/dN = C \Delta K^m \quad (3)$$

実際の $da/dN - \Delta K$ 曲線は、第4図のようにな



第4図 疲労亀裂進展特性

り、(3)式であたえられる安定成長域のほかに、 ΔK の下限界と上限界が存在する。(3)式の m は $2 \sim 4$ の値となることが多い。 ΔK の下限界は da/dN がほぼ 10^{-8} mm/cycle のときで、工業上は亀裂の進展が起らなくなると考えられ、亀裂進展に対する下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} と呼ばれる。したがって、 ΔK が次式を満足するとき欠陥からの亀裂進展がはじまる。

$$\Delta K > \Delta K_{th} \quad (4)$$

また ΔK の上限界は $da/dN \rightarrow \infty$ に対応し、脆性材料では静的破壊じん性値 K_c と関係がある。 ΔK の上限界値 ΔK_c は応力比 $R (= K_{\min}/K_{\max})$ を用いると次のようになる。

$$\Delta K_c = (1 - R) K_c \quad (5)$$

(3)式を初期欠陥寸法 a_i から最終破壊が起った限界亀裂長さ a_f まで積分することにより、亀裂が進展して破壊にいたるまでの繰返し数（亀裂進展寿命） N を求めることができ、次式のようになる。

$$N = \frac{2}{(m-2)C\alpha^m\Delta\sigma^m\pi^{m/2}} \left\{ \frac{1}{a_i^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right\} \quad (6)$$

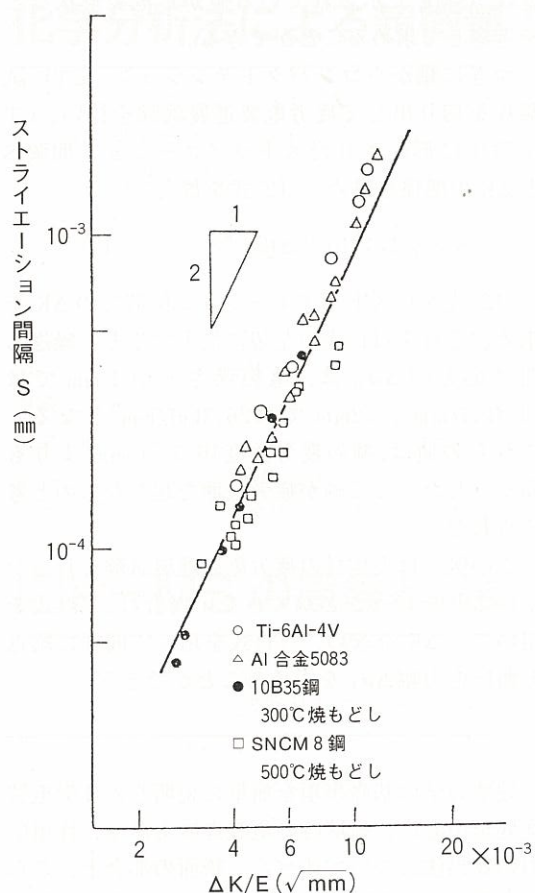
ストライエーションによる方法

(3)式で示される亀裂進展過程は、応力サイクルごとの亀裂先端の塑性鈍化と再鋭化の繰返しによるストライエーション模様生成の過程に対応し、亀裂進展速度 da/dN がストライエーション間隔 S と一致することが知られている。

したがって、破面の観察よりストライエーション間隔 S を測定し、 $S = da/dN$ とおけば、余材の亀裂進展試験から m および C を求めることにより、(3)式を用いて ΔK を求めることができる。

縦弾性係数 E の異なる材料のストライエーション間隔 S は、第5図に示すように $\Delta K/E$ で整理される⁴⁾。多くの工業材料に対するストライエーション間隔 S と $\Delta K/E$ との間に、次の関係があることが知られている⁵⁾。

$$S = 9.4 (1 - \nu^2) (\Delta K/E)^2 \quad (7)$$



第5図 いろいろの合金におけるストライエーション間隔 S と $\Delta K/E$ の関係 ($R=0.06$)

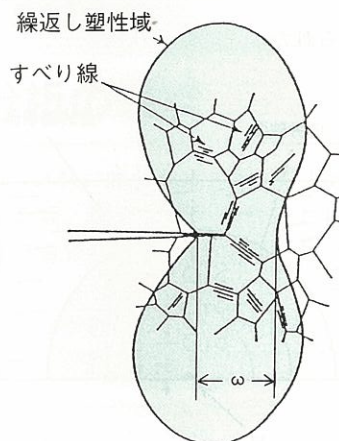
ここに ν はポアソン比である。

(7)式を用いれば、亀裂進展試験により m や C の値を求めることができない場合でも、 ΔK を算出することができる。 ΔK があたえられれば亀裂形状、負荷形態を考慮した補正係数 α 、およびストライエーション間隔測定点の起点からの距離 a を用いて、(2)式から作用応力 $\Delta\sigma$ を求めることができる。

粒界割れ破面率による方法

疲労亀裂の進展速度 da/dN が約 5×10^{-5} mm/cycle と小さい場合は、 ΔK が小さいため、次式で示される塑性域の寸法 ω が小さくなる。

$$\omega = \frac{2}{5.6\pi} \left(\frac{\Delta K}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (8)$$



第6図 繰返し塑性域内部での微細組織を単位とする破壊

第6図に示すように、塑性域中に含まれる結晶粒の数が少ない場合には、粒間の方位差により特定の結晶にすべりが集中し、粒界破壊が起る⁶⁾。このような場合、塑性域の寸法 ω がほぼ結晶粒径 D に等しいとして、(8)式の $\omega = D$ とおくことにより、 ΔK の値が概ね求められる。実験によると、粒界割れ破面率が最大となる ΔK の値は、フェライト鋼で $35 \text{ kgfmm}^{-3/2}$ 程度、焼入焼もどし鋼で $40 \text{ kgfmm}^{-3/2}$ 程度である。

作用応力の解析については、旧 γ (オーステナイト) 粒界ファセット破面率が最大になるときの亀裂長さ a を求め、フェライト鋼の場合 $\Delta K = 35 \text{ kgfmm}^{-3/2}$ とすることにより、応力状態などを考慮して α を求める。簡単のために $\alpha = 1$ とすれば $\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a}$ から作用応力 $\Delta\sigma$ を求めることができる。

4) 小林英男：日本機械学会誌，Vol.80 (1977)，p. 492

5) 小林英男：材料科学，Vol.17 (1981)，p. 282

6) 小林英男ほか：日本機械学会論文集，Vol. 43 (昭52-2)，p. 416

- 7) 橋内良雄：材料試験技術, Vol. 34 (1989), p. 56
 8) 橋内良雄：材料試験技術, Vol. 35 (1990), p. 62

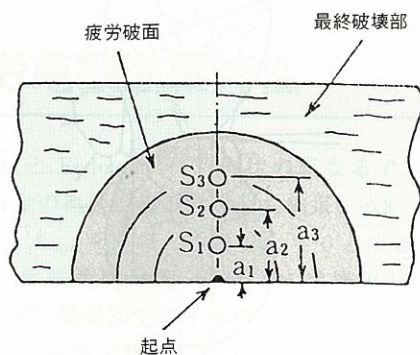
これまでに解析方法の基本について述べた。実際に破壊した歯車、ボルトなどの破壊解析例が報告されている^{7), 8)}。その中から、破壊したまき上げドラム軸の亀裂進展寿命、および作用応力を推定した例を紹介する。

破壊は、軸の外周部を起点とし、破面にはいくつかのぼんやりとしたビーチマークが認められた。破面から推察すると、繰返し曲げにより、外周の起点部から軸心に向かって疲労亀裂が進展したものと考えられた。

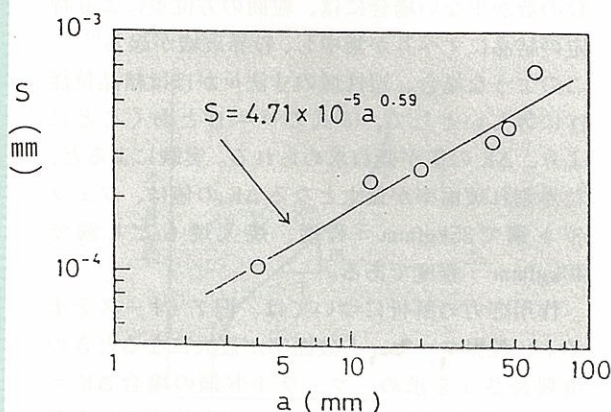
実体破面の起点から、第7図に模写的に示すように、亀裂深さ a の異なるいくつかの位置でストライエーション間隔 S を測定し、両対数紙上に S と a をプロットして第8図を得た。 S と a の間に C_0 、 n を定数として

$$S = C_0 a^n = 4.71 \times 10^{-5} a^{0.59} \quad (9)$$

の関係が得られた。



第7図 破面上におけるストライエーション間隔の測定位置



第8図 ストライエーション間隔 S と起点からの距離 a の関係

(9)式において $S = da/dN$ とし、初期亀裂長さ a_i から最終破壊の亀裂長さ a_f まで積分すると、破壊にいたるまでの繰返し数 N は次のようになる。

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{S} da = \frac{1}{C_0(1-n)} [a_f^{(1-n)} - a_i^{(1-n)}] \quad (10)$$

ここで、 a_i を 1mm と仮定し、 a_f は約 70mm、 $C_0 = 4.71 \times 10^{-5}$ 、 $n = 0.59$ とすると $N = 243,803$ となり、破断するまでに 24 万回程度の繰返しを受けたことになる。

稼働応力の推定に関しては、亀裂が短い範囲の ΔK は、半円状の表面亀裂を有する板が、曲げを受けた場合のそれと等しいと仮定すると、 ΔK は次式のようにになる。

$$\Delta K = M_b \Delta \sigma_b \sqrt{\pi a/Q} \quad (11)$$

ここで M_b は曲げ応力修正係数、 $\Delta \sigma_b$ は曲げ応力範囲、 Q は亀裂形状パラメーターである。 M_b 、 Q は ASME で示されている値から亀裂形状などを考慮して求めることができる。

つぎに軸からコンパクトテンション (CT) 試験片を切り出して疲労亀裂進展試験を行い、CT 試験片に形成されたストライエーション間隔 S と ΔK の関係を求め、(12)式を得た。

$$S = 8.17 \times 10^{-10} \Delta K^{2.58} \quad (12)$$

(12)式からストライエーション位置での ΔK を求め、それを (11)式の左辺に代入すると、繰返し曲げ応力幅 $\Delta \sigma_b$ は、亀裂深さ a が 4 mm では 24.4 kgf/mm^2 、12 mm では 26.3 kgf/mm^2 となる。これらの値は、軸の疲労強度 16.5 kgf/mm^2 よりも高く、したがって軸が疲労破壊を起したものと考えられた。

この例では実体材の疲労亀裂進展試験を行ったが、これを行うことができない場合は、(7)式を用いて、 ΔK を求め、(11)式を用いて同様に繰返し曲げ応力幅 $\Delta \sigma_b$ を求めることができる。

破壊力学の基礎事項を簡単に説明し、疲労亀裂進展を中心に、破壊時の亀裂進展寿命や、作用応力の算出法について述べた。紙面の都合上、さらに筆者の力不足もあって、十分な説明ができなかったことをお詫びする。

[受託研究本部 材料研究部 高島孝弘]