材料強度学(5)

疲労き裂進展

(Fatigue crack growth)

構造部材には常にき裂やき裂発生箇所が存在 繰返し応力下でき裂は不可避的に発生・進展



材料因子や応力状態を表す因子に基づく疲労寿命予測手法の開発が重要



破壊力学を用い、急速破壊を生じさせないための臨界き裂長さを決定すること

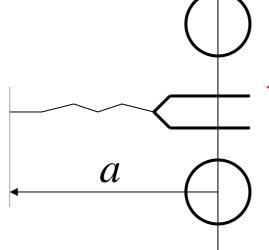
ほとんどの金属材料は、繰返し応力下での安定き裂進展後、 破壊に至る

疲労き裂進展に関する実験的検討

切欠き付破壊力学試験片を使用 一定荷重振幅下で試験 数mm~数十mmの貫通き裂を対象

き裂進展速度の定量化・き裂進展機構の検討

一定荷重(応力)振幅下の疲労き裂進展は、実用的 問題を検討するための重要な基礎 疲労き裂進展試験に用いる標準試験片とき裂長さ の定義



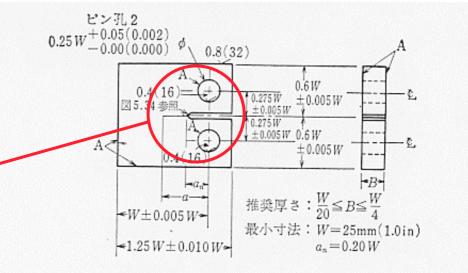
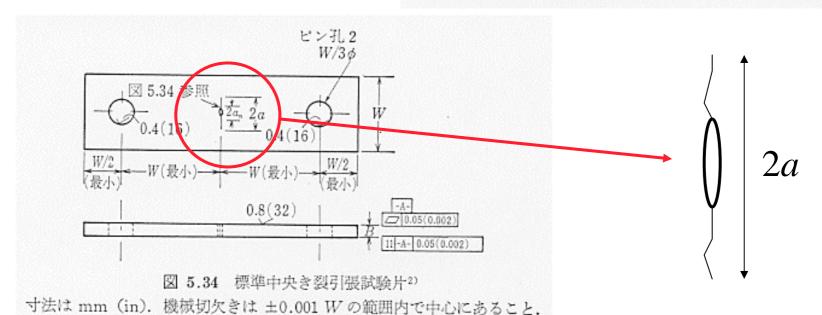


図 5.33 標準コンパクト試験片2)

寸法は mm (in). A 表面は 0.002~W の範囲内で互いに垂直か平行なこと、 機械切欠き (a_n) 先端と 試験片表面の 交点は 0.0005~W の範囲内で試験片の 上端縁と下端縁から等距離にあること.



疲労き裂進展速度の求め方

繰返し数(N)の増加に伴うき裂長さの変化 を測定

曲線の勾配がき裂進展速度 da/dN

- (1) き裂進展速度はき裂長さの増加とともに増加
- (2) き裂長さが同じであれば、負荷応力の増加ととも に増加

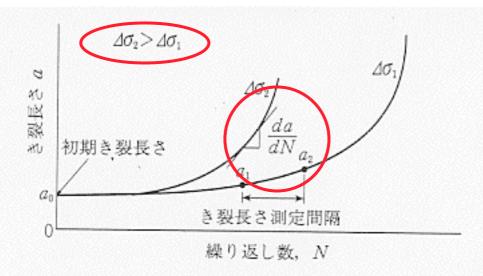


図 7.12 一定荷重(応力)疲労き裂成長試験で得られる典型的なき裂成長曲線

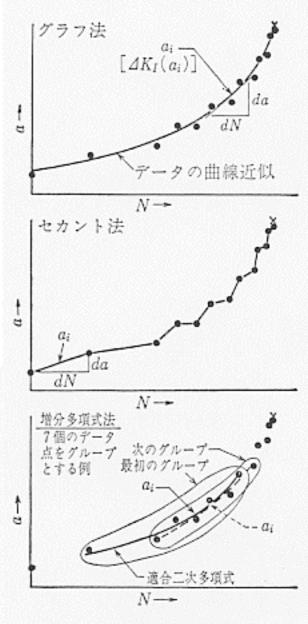


図 5.38 き裂進展速度の決定 手法⁵⁴⁾

疲労き裂進展をどう定量評価するか?

da / dN - K曲線

試験片に負荷される応力が小さく、き裂先端での塑性変形領域が非常に小さい場合(小規模降伏条件が満たされている場合)には線形破壊力学による解析が可能。

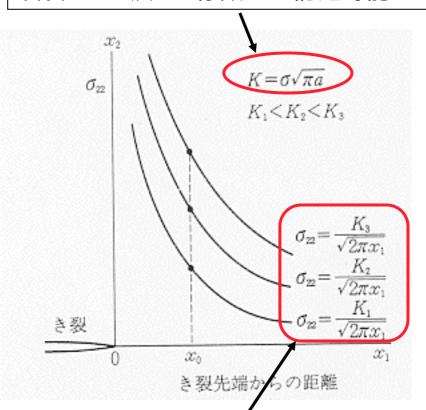
負荷1サイクルあたりのき裂進展量、すなわちき裂進展速度(da/dN)を、き<mark>裂先端の応力拡大係数の変動幅</mark> Kを用いて整理可能。

($K = K_{\text{max}} \cdot K_{\text{min}}$ 、ただし K_{max} 、 K_{min} は各々繰返し応力下での最大および最小応力拡大係数)

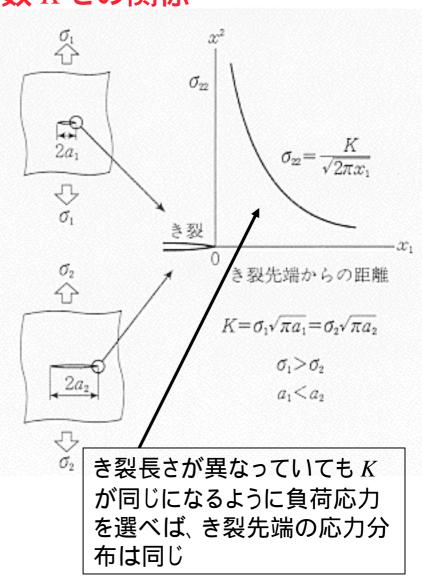
(復習)応力拡大係数Kとは何か?

き裂先端の応力分布と応力拡大係数 K との関係

き裂先端の応力場は無限遠の応力 とき 裂長さ a で決まる係数 K で記述可能



き裂先端近傍の任意の位置の応 力は *K* の値によって決まる



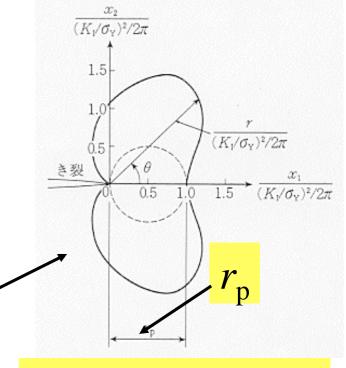
き裂先端の塑性域

- ・ 弾性論に基づ〈応力解析では、き裂先端で応力は無限大
- ・ 金属のような材料(弾塑性体)は降伏応 力以上で塑性変形
- ・ き裂先端ではき裂成長に先行して 塑性変形が起こる

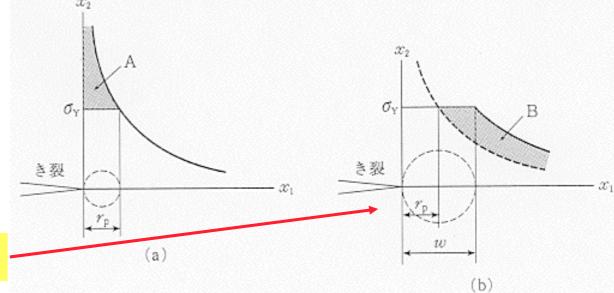
塑性変形しているき裂先端近傍の領域 塑性域

降伏が起こるとAの領域に相当する応力は Bのような領域に再分配

$$w = (1 /)(K_{\rm I} / {\rm y})^2$$



$$r_{\rm p} = (1/2)(K_{\rm I}/_{\rm Y})^2$$



小規模降伏

たとえ塑性域がき裂先端に存在していても、塑性域寸法がき裂長さに対して十分小さいならば、塑性域の存在はその外側の弾性域の応力分布に大きな影響を及ぼさない。



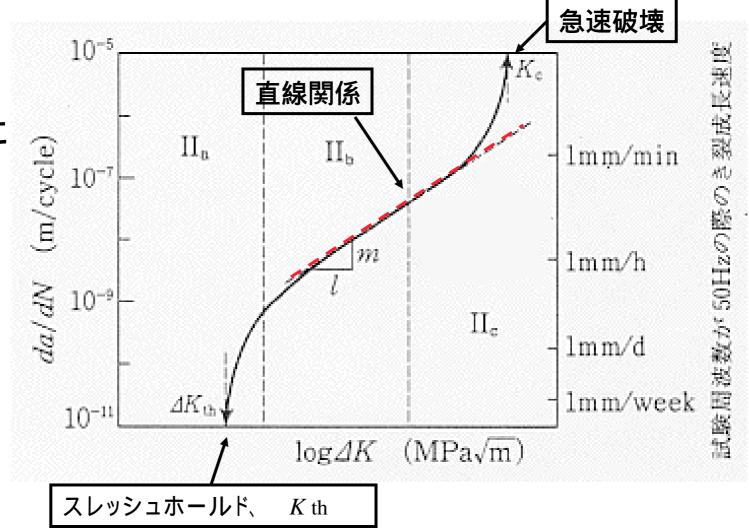
小規模降伏 (small scale yielding)

小規模降伏条件が満たされる限り、き裂先端の応力場は依然として応力拡大係数Kによって記述可能であり、塑性域寸法もKと降伏応力の関数として表せる。

da / dN - K曲線

疲労き裂進展曲線: log (da / dN) - log (K)関係

a、b、 c の3領域に 分類



パリス則

b領域では、da/dNと Kの間に指数則が成立

$$da/dN = A (K)^m$$

- · A、mは、材料組織、負荷周波数、応力波形、試験環境、 試験温度、応力比Rに依存する定数
- ・ mは金属材料で2~4

$$K \max = Y \quad \max \quad a$$
 $K \min = Y \quad \min \quad a$
 $K = Y \quad a$

Y は試験片の幅W に対するき裂長さaの比 a /Wに依存する形状因子

$da/dN = A(K)^m$ が成立

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = \log[A(\Delta K)^m]$$

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = m\log\Delta K + \log A$$

パリス則に基づく疲労寿命の推定

$$dN = \frac{da}{A(\Delta K)^m}$$

$$N_f = \int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{A(\Delta K)^m}$$

$$N_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{A(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m}$$

$$= \frac{1}{A\pi^{m/2}(\Delta\sigma)^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{Y^m a^{m/2}}$$

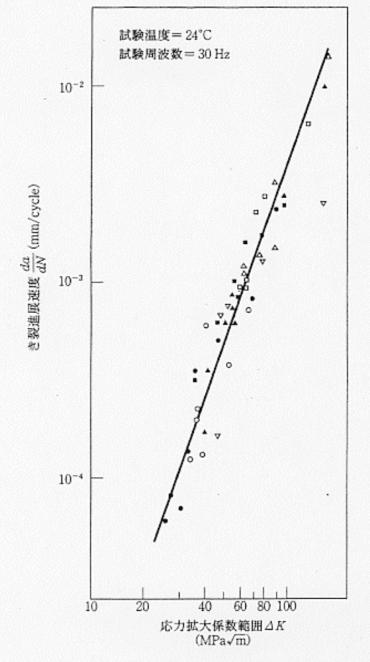


図 3.31 Ni-Mo-V 鋼の log(da/dN)-log(ΔK)曲線

演習問題

鋼板を引張応力100MPa、圧縮応力50MPaで繰返し引張・圧縮する。試験前の検査により、最大表面き裂長さは2.0mmであることがわかっている。この鋼板の平面ひずみ破壊靭性値 $K_{\rm LC}$ は25MPa mである。

 $da/dN = A(K)^m$ の定数 m とA がそれぞれ 3.0、 1.0×10^{-12} であり、 、a がそれぞれ MPa、mで与えられているとき、この鋼板のステージ 疲労寿命を推定せよ。なお 圧縮側の応力はき裂進展に寄与せず、Y はき裂長さによらず 1 とする。また、この場合、 K_{Ic} と a_c との関係は次式で与えられるものとする。

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma Y} \right)^2$$

解答

まず臨界き裂長 さ*a*_cを求める。 最大引張応力は 100MPaだから、

次に、下限値 a_0 を用いて、 N_f を求める。 minは圧縮であるから、 は引張応力分の100MPaである。 積分すると、

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma Y} \right)^2$$
$$= \frac{1}{\pi} \left(\frac{25 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}}{(100 \text{ MPa})(1)} \right)^2 = 0.02 \text{ m}$$

$$N_{f} = \frac{1}{A\pi^{m/2}(\Delta\sigma)^{m}} \int_{a_{0}}^{a_{c}} \frac{da}{Y^{m}a^{m/2}}$$

$$= \frac{1}{A\pi^{3/2}(\Delta\sigma)^{3} Y^{3}} \int_{a_{0}}^{a_{c}} a^{-3/2} da$$

$$= \frac{1}{A\pi^{3/2}(\Delta\sigma)^{3} Y^{3}} (-2)a^{-1/2} \Big|_{a_{0}}^{a_{c}}$$

$$= \frac{2}{A\pi^{3/2}(\Delta\sigma)^{3} Y^{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{a_{0}}} - \frac{1}{\sqrt{a_{c}}}\right)$$

$$= \frac{2}{(1.0 \times 10^{-12})(\pi)^{3/2}(100)^{3}(1)^{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{0.002}} - \frac{1}{\sqrt{0.002}}\right)$$

$$= 5.49 \times 10^{6} \text{ cycles}$$