

二軸荷重を受ける円形剛体介在物に発生するはく離とクラックの連成問題

名古屋工業大学 学生員 ○山本 泰幹
名古屋工業大学 正 員 中村 卓次

名古屋工業大学 正 員 長谷部 宣男

1. まえがき 本研究は、介在物の界面はく離とクラックによる破壊現象を明らかにする目的で、応力解析を行ったものである。図-1に示すように、(a)無限弾性体中に存在する円形剛体介在物に二軸一様荷重が作用し、I点から発生したはく離の先端が、(b)角 θ で表される位置まで進展したとき、さらにこのはく離が進展するのがあるいは、(c)はく離端からクラックが生ずるのか、どちらの現象が起きるかということを検討する。これにより、界面はく離とクラックによる破壊現象がどのように起きるかを定めることができる。x軸方向一様荷重 p を基準とした場合については既に参考文献1)で報告した。本報告では、y軸方向一様荷重 q を基準とした場合について報告する。

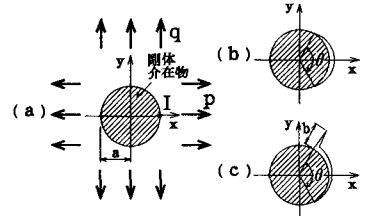


図-1 解析モデル

2. 解析方法と結果 はく離の進展に関する指標として、はく離進展によるエネルギー解放率 G_d を用いる²⁾。 G_d は、はく離の応力の強さ $|\tilde{\beta}_0|$ を用いて表される³⁾。ここでは $|\tilde{\beta}_0|$ を無次元化した値 F_d を用いる。

$$G_d = \{ \pi \kappa (1 + \kappa) / 2 \mu \} \cdot F_d^2 \quad (1)$$

$$F_d = |\tilde{\beta}_0| / (q \sqrt{a}) \quad (2)$$

ここに、 κ はポアソン比 ν の関数で $\kappa = 3 - 4\nu$ {平面歪}、 $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ {平面応力}、 μ はせん断弾性係数を表す。 q は荷重、 a は介在物の半径を表す。クラックの発生に関する指標として、クラック発生直後のエネルギー解放率 G_c を用いる。 G_c はクラック発生直後のモードIおよびモードIIの応力拡大係数 K_I 、 K_{II} を用いて表され、ここでは K_I 、 K_{II} を無次元化した値 F_I 、 F_{II} を用いる。 i は虚数単位を表す。

$$G_c = \{ \pi (1 + \kappa) / 8 \mu \} \cdot (F_I^2 + F_{II}^2) \quad (3)$$

$$F_I + i F_{II} = (K_I + i K_{II}) / (q \sqrt{\pi a}) \quad (4)$$

この G_c をもって、クラック発生に関するエネルギー解放率とする。これらのエネルギー解放率 G_d 、 G_c と、はく離先端の位置を示す角 θ の関係を $\kappa = 2$ の場合について図-2と3に示す。荷重はy軸方向荷重 $q > 0$ あるいは $q < 0$ に対し、x軸方向荷重 p を $p/q = -1 \sim 1$ まで0.2きざみで変化させて求めた。 p 、 q の符号は引張を正とする。図-3のクラック発生のエネルギー解放率 G_c は、クラックの長さを示す値 b/a が0.0005に対して示す。なおこのクラックは、はく離先端から境界法線方向への微小クラックを考えている。ここでエネルギー解放率により表されるはく離進展の破壊靱性値を G_{d0} 、同じくクラック発生の破壊靱性値を G_{c0} と表すと、はく離先端が角 θ の位置にあるときの G_d と G_{d0} 、 G_c と G_{c0} の大小関係より次のことが言える。

- (A) $G_d < G_{d0}$ かつ $G_c < G_{c0}$ の場合：そのはく離は進展せず、クラックも発生しない。
- (B) $G_d < G_{d0}$ かつ $G_c \geq G_{c0}$ の場合：そのはく離は進展せず、クラックが発生する。
- (C) $G_d \geq G_{d0}$ かつ $G_c < G_{c0}$ の場合：そのはく離が進展し、クラックは発生しない。
- (D) $G_d \geq G_{d0}$ かつ $G_c \geq G_{c0}$ の場合：そのはく離が進展する可能性も、クラックが発生する可能性もある。

上記(D)の場合については、さらにはく離とクラックのどちらの現象が起きるかを判断することが必要になる。この判断には、はく離とクラックのエネルギー解放率の比 G_d/G_c および破壊靱性値の比 G_{d0}/G_{c0} を考える。 G_d/G_c と θ の関係を図-4に示す。 G_{d0} 、 G_{c0} が材料によって決まる一定値ならば、 G_{d0}/G_{c0} は図-4で横軸に平行な直線として表される。はく離先端が角 θ の位置にあるときの G_d/G_c と G_{d0}/G_{c0} の大小関係より、次のことが言える。

- (ア) $(G_d/G_c) < (G_{d0}/G_{c0})$ の場合：クラックが発生する。

(イ) $(G_d/G_c) > (G_{d0}/G_{c0})$ の場合：はく離が進展する。

$q > 0$ の場合の、無次元化した微小クラックのモード I の応力拡大係数 F_I と θ の関係を図-5 に示す。 $F_I > 0$ でクラックが発生する場合にこの図をクラック発生時の制約条件として活用する。 $q > 0$ の場合の、はく離先端から $(0.1/180)\pi a$ だけ離れた介在物境界面上の法線方向の応力 σ_r/q と θ の関係を図-6 に示す。 $\sigma_r > 0$ の引張応力で、はく離が進展する場合にこの図をはく離進展の制約条件として活用する。

3. 具体例

つぎに、 F_I や σ_r の制約条件を考えて二軸一様引張荷重 ($p/q = 1.0$) が作用する場合を例にとり、もう少し具体的に説明する。図-5 より F_I は $\theta = 360^\circ$ までは正であるので、クラック発生時の制約条件は介在物の全周にわたり満足されている。図-6 より σ_r は $\theta = 235^\circ$ あたりまでは正であるので、図-2 でひとたび G_d が G_{d0} を超えれば、はく離は $\theta = 235^\circ$ あたりまで進展できる。しかし、図-3 よりはく離進展とともに G_c も大きくなっており、はく離が $\theta = 235^\circ$ あたりまで進展するまでに G_c が G_{c0} を超える場合が考えられる。このときの状態は、前述の (C) の条件から (D) の条件に変わる場合となる。したがって、 $G_c \geq G_{c0}$ となったあとは図-4 のエネルギー解放率の比 G_d/G_c を使った判断が必要になる。例えば、破壊靱性値の比 G_{d0}/G_{c0} が 2.0 (図中の①線) の場合は、はく離進展中に $G_c \geq G_{c0}$ となったとき、前述の (ア) の条件を満足するので、その θ の位置でクラックが発する。 G_{d0}/G_{c0} が 0.25 (図中の②線) の場合は、(イ) の条件より、はく離が $\sigma_r > 0$ の $\theta = 235^\circ$ あたりまで進展し、そこで止まる。しかし $G_c > G_{c0}$ なので、そこでクラックが発生する。

他の荷重比 p/q の場合についても同様に考察できる。 $q < 0$ の場合にも F_I と σ_r の制約条件の符号を変えれば、界面はく離とクラックの破壊現象がどのように起きるかを定めることができる。

参考文献

- 1) 山本ら：土木学会第47回年次学術講演会概要集, pp. 480-481 (1992)
- 2) 長谷部・奥村・中村：材料, 第39巻, 445号, pp. 1405-1410 (1990)
- 3) N. Hasebe et al., J. Appl. Mech., Vol. 110, pp. 574-579 (1988)

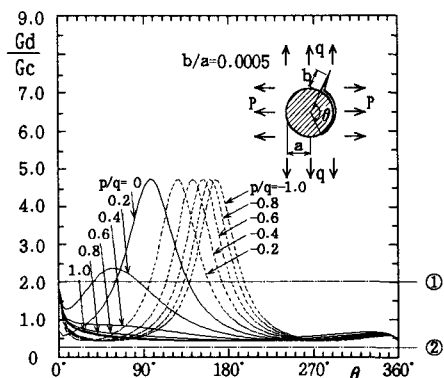


図-4 はく離とクラックのエネルギー解放率の比

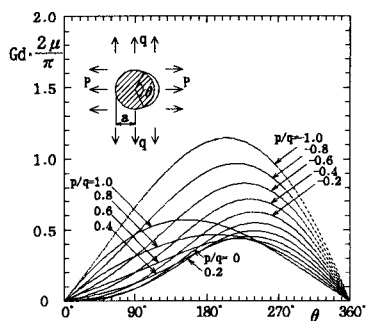


図-2 q を基準としたはく離進展のエネルギー解放率

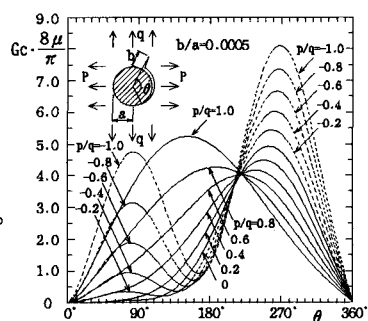


図-3 q を基準としたクラック発生時のエネルギー解放率

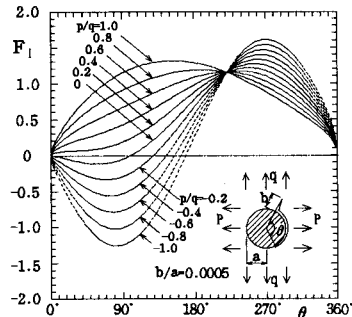


図-5 q ($q > 0$) を基準とした無次元化したモード I の応力拡大係数

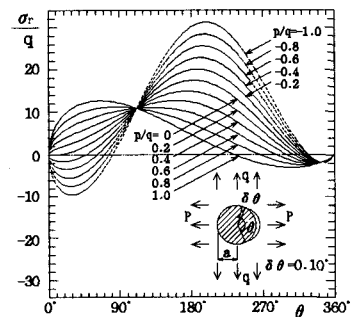


図-6 q ($q > 0$) を基準としたはく離先端近傍界面の法線方向応力