

I-402 二軸荷重下の円形剛体介在物から発生するはく離とクラック

名古屋工業大学 学生員 ○山本 泰幹 中部電力㈱ 正員 上田 稔  
 名古屋工業大学 正員 長谷部 宣男 名古屋工業大学 正員 中村 卓次

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)無限弾性板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どのような破壊現象が起きるかを定めることができる。x軸方向あるいはy軸方向一様荷重が作用する場合には既に参考文献1)、2)で報告したが、解析で用いるエネルギー解放率については重ね合わせができないので、本報告では、二軸一様荷重が作用する場合のエネルギー解放率を新たに求めた。

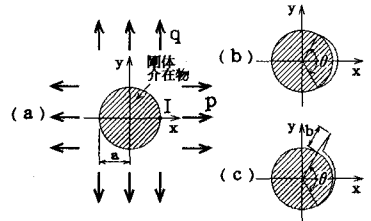


図-1 解析モデル

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 $G_a$ を用いる<sup>3)</sup>。 $G_a$ は、はく離の応力の強さ $|\tilde{\beta}_0|$ を用いて表される<sup>4)</sup>。ここでは $|\tilde{\beta}_0|$ を無次元化した値 $F_a$ を用いる。

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

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

ここに、 $\kappa$ はポアソン比 $\nu$ の関数で $\kappa=3-4\nu$  {平面歪}、 $\kappa=(3-\nu)/(1+\nu)$  {平面応力}、 $\mu$ はせん断弾性係数を表す。 $p$ 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。

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

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

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 $G_a$ 、 $G_c$ と、はく離の位置を示す角 $\theta$ の関係を $\kappa=2$ の場合について求めた結果を定数項を除いた形で図-2と3に示す。荷重はx軸方向引張荷重 $p>0$ に対し、y軸方向荷重 $q$ を-1から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のクラック発生時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0.005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 $G_{a0}$ 、同じくクラック発生時の破壊靱性値を $G_{c0}$ と表すと、はく離が角 $\theta$ の位置にあるときの $G_a$ と $G_{a0}$ 、 $G_c$ と $G_{c0}$ の大小関係より次のことが言える。

- (A)  $G_a < G_{a0}$ 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)  $G_a < G_{a0}$ かつ $G_c > G_{c0}$ の場合：そのはく離は進展せず、クラックが発生する。
- (C)  $G_a > G_{a0}$ 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)  $G_a > G_{a0}$ かつ $G_c > G_{c0}$ 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ための基準が必要になる。この判断には、エネルギー解放率の比 $G_a/G_c$ および破壊靱性値の比 $G_{a0}/G_{c0}$ を考える。 $G_a/G_c$ と $\theta$ の関係を図-4に示す。 $G_{a0}$ 、 $G_{c0}$ が材料によって決まる一定値ならば、 $G_{a0}/G_{c0}$ は図-4で横軸に平行な直線として表される。はく離が角 $\theta$ の位置にあるときの $G_a/G_c$ と $G_{a0}/G_{c0}$ 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。

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  $\theta$  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 の制約条件として活用する。 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  $\sigma_r/p$  と  $\theta$  の関係を図-6 に示す。  $\sigma_r/p > 0$  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  $\sigma_r$  の制約条件を考慮して二軸一様引張荷重 ( $q/p=1.0$ ) 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 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  $\sigma_r$  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、  $G_c > G_{c0}$  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  $G_c > G_{c0}$  となったとき、 前述の (ア) の条件より、 その  $\theta$  の位置でクラックが発生する。  $G_{d0}/G_{c0}$  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。

**参考文献**

- 1) 山本ら: 応用力学連合講演会講演予稿集, pp. 271-272 (1992)
- 2) 山本ら: 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 60-61 (1992)
- 3) 長谷部・奥村・中村: 材料, 第39巻, 445号, pp. 1405-1410 (1990)
- 4) N. Hasebe et al., J. Appl. Mech., Vol. 110, pp. 574-579 (1988)

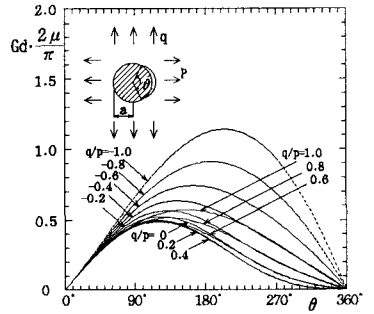


図-2 はく離進展のエネルギー解放率

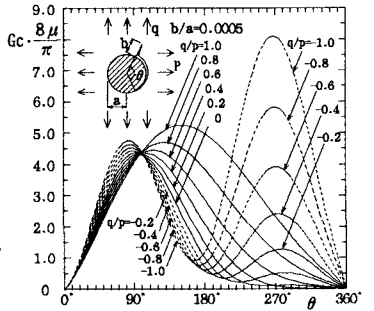


図-3 クラック発生 のエネルギー解放率

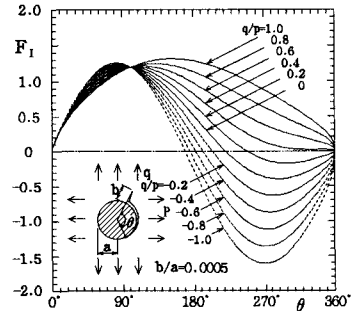


図-5 無次元化した応力拡大係数

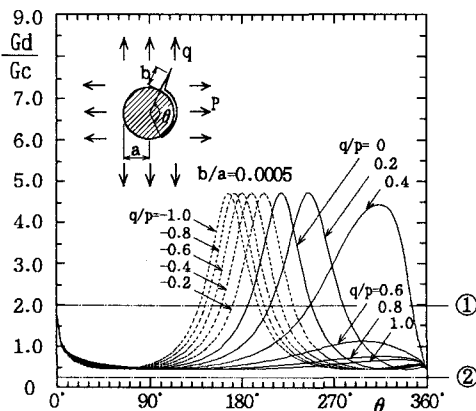


図-4 エネルギー解放率の比

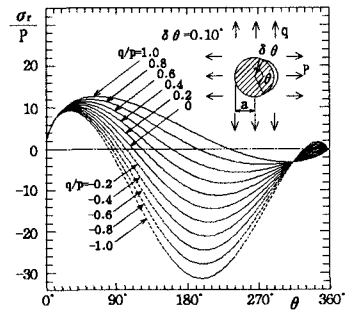


図-6 はく離先端近傍の法線方向応力成分