

CS 54

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

首都高速道路公団 正会員 山本 泰幹
名古屋工業大学 正会員 中村 卓次

名古屋工業大学 正会員 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一様荷重が作用し、2カ所の初期はく離の先端が、(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どのような破壊現象が起きるかを定めることができる。初期はく離が1ヶ所存在する場合は、既に参考文献1)で報告した。本報告ではそれを発展させて、円形剛体介在物の界面に2ヶ所のはく離が存在する場合を報告する。

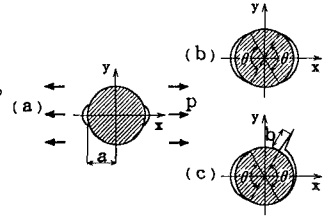


図-1 解析モデル

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。 $\tilde{\beta}_0$ は、はく離先端近傍での応力特異点の強度を表す指標であり、複素応力関数を用いて求めることができる³⁾。ここでは $|\tilde{\beta}_0|$ を無次元化した値 F_d を用いる。

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

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

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}、 G はせん断弾性係数を表す。 p は荷重、 a は円形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及びモードIIの応力拡大係数 K_I 、 K_{II} を用いて表される。また、ここでは K_I 、 K_{II} を無次元化した値 F_I 、 F_{II} を用いる。

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

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

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。式(4)中の i は虚数単位を表す。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 κ を変えて求めた結果を図-2と3に示す。 p 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 $b/a = 0.0005, 0.001$ 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 の位置にあるとき生じる破壊の挙動について、 G_d と G_{d0} 及び G_c と G_{c0} の大小関係より後述する制約条件を満足するとき、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：そのはく離は進展し、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。

G_d と G_c の一方が破壊靱性値を越える場合には、越えた方の破壊挙動が生ずる。両方共に越えた(D)の条件の場合については、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、はく離とクラックのエネルギー解放率の比 G_d/G_c 、及びはく離とクラックの破壊靱性値の比 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} の値が材料によって決まる一定値ならば、破壊靱性値の比 G_{d0}/G_{c0} の値は、図-4で横軸に平行な直線として表される。はく離が角 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。

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。クラック発生・進展の制約条件として、 $F_I > 0$ を用い、この図を活用する。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 σ_r/p と θ の関係を図-6に示す。はく離進展の制約条件として、 $\sigma_r > 0$ の引張応力で、はく離が進展すると、この図を活用する。

制約条件として用いる図-5, 6は、 $p > 0$ の引張荷重に対して示されている。 $p < 0$ の圧縮荷重の場合には、縦軸の応力拡大係数、応力の符号を逆にして考えればよい。

3. 考察 前述の (D) の条件に該当する場合は、はく離も進展し、クラックも発生する可能性がある。このため、図-4の、はく離とクラックのエネルギー解放率の比 G_d/G_c を使って判断する。 $\kappa = 2$ の場合を例にとり、 G_{d0}/G_{c0} の値が、 $\kappa = 2$ の極大値と極小値の間にある、例えば $G_{d0}/G_{c0} = 2.0$ (図-4の①線) として、具体的に説明する。図-4より $0^\circ < \theta < 162^\circ$ (162° は①線と曲線 G_d/G_c との交点) の大きさの初期はく離がある場合は、前述の (ア) の条件を満足し、かつ $F_I > 0$ である。したがって、初期はく離角 θ のはく離端でクラックが発生する。 $162^\circ < \theta < 172^\circ$ ($172^\circ < \theta < 180^\circ$ の範囲では $F_I < 0$) の場合は、前述の (イ) の条件に当たる。しかし、 $F_I > 0$ 、 $\sigma_r < 0$ であるので、この場合もはく離は進展せず、クラックが発生する。 $172^\circ < \theta < 180^\circ$ の場合は、 $F_I < 0$ 、 $\sigma_r < 0$ である。したがって、クラックの発生も、はく離の進展も生じない。

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) 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)

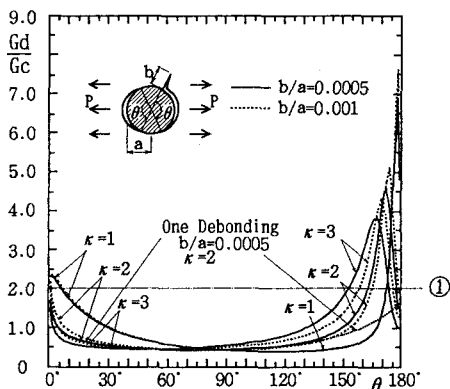


図-4 はく離とクラックのエネルギー解放率の比

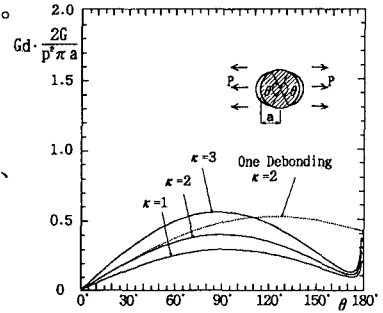


図-2 はく離進展のエネルギー解放率

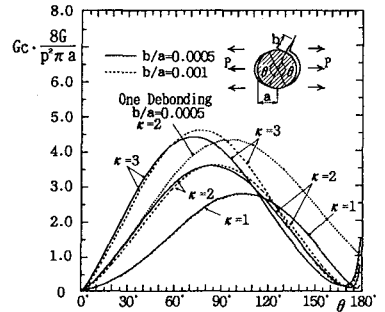


図-3 クラック発生・進展のエネルギー解放率

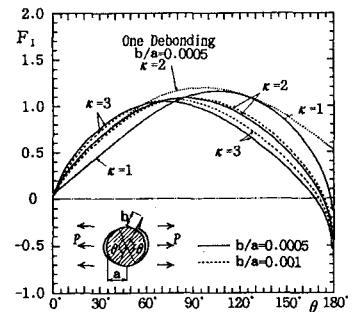


図-5 微小クラックのモード I の応力拡大係数

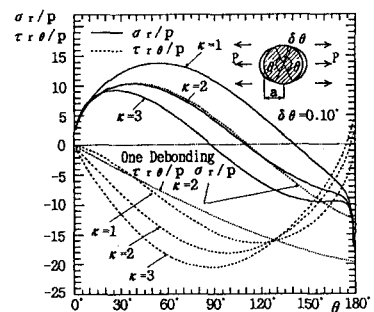


図-6 はく離先端近傍界面の法線方向応力