

I-19

介在物界面のはく離進展に関する考察

名古屋工業大学 学 児島清隆 正 長谷部宣男 正 中村卓次
中部電力 正 上田 稔 正 東側豊二

1. まえがき 介在物と母材との界面におけるはく離進展の問題は、介在物を起点とするクラックの発生に関わる重要な問題であり、いままでに幾つかの介在物形状については解析がなされている。本研究では、上下左右対称なく形剛体介在物について、2つの左右に非対称なはく離が存在するときの、はく離先端での応力集中について考察したものである。はく離の進展の判別には、クラック先端での応力拡大係数に相当するはく離先端でのはく離の強さを定義し、それによりはく離進展の検討を行う。

2. 解析手法 解析手法については「文献1」に述べてあるので省略する。

3. はく離先端でのはく離の強さ 図-1に示すはく離点 Z_A の近傍にある点 Z について、複素応力関数の一階微分 $\phi'(z)$ は次式

$$\phi'(z) = \alpha_d (z - z_A)^{m-1}$$

で表される。ここに α_d は複素定数である。ここに m は、 $m = 0.5 - i\lambda$ 、 $\lambda = (\ln \kappa) / (2\pi)$ であり、 κ は材料定数でポアソン比 ν によって $\kappa = 3 - 4\nu$ (平面ひずみ状態)、 $\kappa = (3 - \nu) / (1 + \nu)$ (平面応力状態)と表される。図-1のような基準化した座標系(x, y)を導入すると、はく離点近傍の介在物と接する界面での応力は次のように書き表される「文献2」。

$$\sigma_x = (3 - \kappa) \frac{|\widetilde{\alpha_d}|}{\sqrt{r}} \cos(\theta_0 + \lambda \ln r)$$

$$\sigma_y = (1 + \kappa) \frac{|\widetilde{\alpha_d}|}{\sqrt{r}} \cos(\theta_0 + \lambda \ln r)$$

$$\tau_{xy} = -(1 + \kappa) \frac{|\widetilde{\alpha_d}|}{\sqrt{r}} \sin(\theta_0 + \lambda \ln r)$$

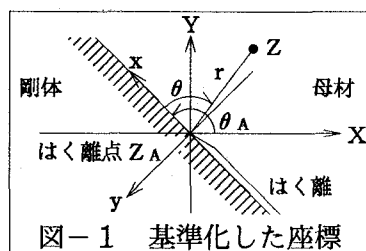


図-1 基準化した座標

ここに、 $\widetilde{\alpha_d}$ は $\widetilde{\alpha_d} = \alpha_d \exp\{i(m-1)\theta_A\}$ であり、 θ_A は図-1に示すように界面のX軸からの傾きである。また、 r, θ は接着域の界面を起点として、母材の方へ角度 θ をとる極座標成分である。介在物と接する界面では $\theta = 0$ である。 θ_0 は、 $\widetilde{\alpha_d}$ の偏角の主値で $\theta_0 = \arg(\widetilde{\alpha_d})$ で表される。はく離点近傍での応力集中は、 $|\widetilde{\alpha_d}|$ を指標として、議論できる。実際の比較検討には、はく離先端のはく離の強さを次のように無次元化して行う。

$$F = \frac{|\widetilde{\alpha_d}|}{p\sqrt{a}}$$

4. 結果 ここでは、く形の角度 δ が 90° の正方形に対し、X軸方向一様引張荷重が作用した場合(図-3)、Y軸方向一様圧縮荷重が作用した場合(図-4)のはく離の強さ F_b, F_c の値を示す。材料定数 $\kappa = 2.0$ とし、一方のはく離の大きさ c/a を固定し、もう一方のはく離の大きさ b/a を変えて、計算を行った。固定側のはく離先端のはく離の強さを F_c 、移動側のを F_b とし、 F_c を破線で、 F_b を実線で示す。また、図-2には対称な位置($c/a = b/a$)にはく離が存在するときのはく離の強さをX軸方向一様引張荷重は実線でY軸方向一様圧縮荷重は破線で示し、それぞれの図-3, 4の対応する点を▲と●で表す。当然ながらこのときには、 $F_b = F_c$ である。図-2より、対称なはく離では、X軸方向一様引張の場合には、はく離の強さは、ゆるやかであるが途中で極値を持つのにに対し、Y軸方向一様圧縮の場合には単調増加という違いがある「文献3」。図-3, 4より、非対称なはく離では、どちらの荷重条件の場合も相手のはく離の大きさに対

して、はく離の大きさの大きい方ははく離の強さが、はく離の小さい方のそれよりも大きく、はく離の大きさの差が大きい程その差も大きくなり、ますますその差は開くことがわかる。これを式で表すと『 $c/a \equiv b/a$ ならば $F_c \equiv F_b$ である。』と表される。はく離の大きさに違いがあれば、はく離は、はく離の大きい方が進展しやすいと言える。また、荷重の作用の仕方による特徴として、X軸方向一様引張荷重では相手のはく離の大きさ(c/a)が小さい程 F_b （実線）は大きく、はく離が進みやすいのに対して、Y軸方向一様圧縮荷重では、はく離は相手のはく離の大きさ(c/a)に対し F_b （実線）はあまり変化しないのがわかる。しかし、わずかが相手のはく離の大きさ(c/a)が大きい程特異性値 F_b も大きくX軸方向一様引張荷重の場合と逆であることがわかる。次にこの形状による特徴としてく形の界面に沿ったはく離の進展は、はく離の大きさが、大きいとき($b/a=0.9 \sim 1.0$)にはく離の強さの増加が大きくはく離が進展しやすいことがわかる。また、楕円介在物や円形介在物に沿う界面はく離の進展が途中で極値を持ちはく離の進展が止まる〔文献4, 5, 6〕のとは違い、このく形に沿う界面はく離は、極値を持たないため母材にクラックが入らないと仮定できるくらい母材と介在物の接着の強さが母材の材質に比べて弱い場合には、一旦はく離が進み始めると、はく離は界面の全周にわたり進む可能性があるものと思われる。

5. 参考文献

[1] 児島、上田、長谷部、中村 (1990)

第40回応用力学連合講演会予稿集 p. 149

[2] N. Hasebe, S. Tsutsui and T. Nakamura

J. Appl. Mech. vol. 55, September (1988) p. 574

[3] 上田ほか く形介在物のはく離進展に関する

研究 (1991) 中部支部講演概要集 p. 126

[4] N. Hasebe, M. Okumura and T. Nakamura

Int. J. Frac. 32 pp169-183 (1987)

[5] 中西ほか 円形介在物の界面はく離の応力拡

大係数 機論 (A編) 52巻479号

[6] 中西ほか だ円形介在物の界面はく離の応力

拡大係数 機論 (A編) 55巻516号

