

荷重作用下の線状剛体を有する薄板の残留応力及び剥離

名古屋工業大学 学生員 山田 正俊

名古屋工業大学 正員 長谷部 宣男

1. まえがき

供用下でのクラック等の補修後の応力状態、さらにその後の破壊を調べることは、実用的にも重要な問題になってきている。クラックを有する薄板に曲げ荷重が載荷している状態で、クラックを溶接等により補修した後、除荷すると残留変形や残留応力が生じる。特に、クラック先端部に対応する部分では応力集中の可能性があり、クラックや剥離の発生もありうる。ここでは、クラック部が剛に補修された一つの極限の状態を解析する。

図-1(a)は、残留応力がある状態で、剛体端部から剥離が発生した状態といえる。ここで、切り欠きの長さを a 、剥離長さを b 、剛体のなす角を $\theta\pi$ とする。図-1(b)と図-1(c)の重ね合わせにより、図-1(a)の状態が求まる。残留応力のある状態に、さらに曲げモーメント M_1 が載荷された一般の載荷状態での剥離やクラックの可能性について調べる。この状態は図-2で表され、ここでは剥離先端B点やC点の応力特性を、ひずみエネルギー解放率を用いて述べる。

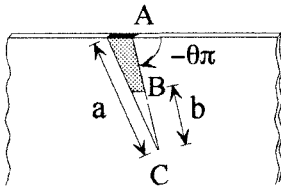


図-1(a)

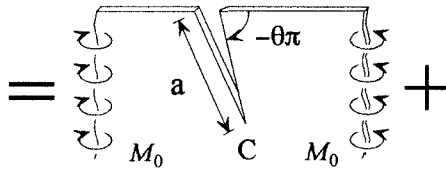


図-1(b)

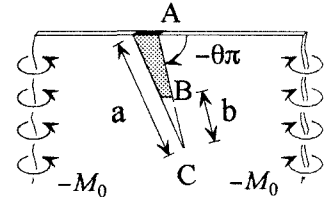


図-1(c)

2. 剥離先端でのひずみエネルギー解放率

図-1, 2の解析領域を、写像関数 $z = \omega(\zeta)$ によって ζ -平面の単位円内に写像する [1]。点A, Bは単位円上の点 $\zeta = \alpha, \beta$ に写像される。 ζ -平面で正則な複素応力関数を $\phi(\zeta)$ 、 $\psi(\zeta)$ とする [2]。このとき、 $\psi(\zeta)$ は解析接続により $\phi(\zeta)$ で表される。

この応力関数を用いて、図-1(c)の剥離先端の応力の強さ $\tilde{\beta}_0^{(u)}$ を求める。 $\tilde{\beta}_0^{(u)}$ は剥離先端の応力特性を表す係数で、次式で表される [3]。

$$\tilde{\beta}_0^{(u)} = 2\sqrt{2}D(1+\nu)\exp(-\pi\delta) \frac{|\omega'(\beta)(\beta-\alpha)|^{1-\lambda} g(\beta)}{\omega'(\beta)(\beta-\alpha)} \exp\left\{i\left(1-\lambda\right)\left(-\pi-\frac{s}{2}\right)\right\} \quad (1)$$

ただし $g(\beta) = \lim_{\zeta \rightarrow \beta} \left[\phi'(\zeta)(\zeta-\alpha)^\lambda (\zeta-\beta)^{1-\lambda} \right]$ 、 s は単位円の中心角で $s = \angle \alpha O \beta$ である。

D は曲げ剛さ、 ν はポアソン比である。 $\lambda = 0.5 - i\delta$ 、 δ はポアソン比により定まる。

式(1)を用いて、図-2の剥離先端の応力の強さ $\tilde{\beta}_0$ とひずみエネルギー解放率 G_{deb} は、次式で表せる [3]。

$$\tilde{\beta}_0 = \left(\frac{M_1}{M_0} - 1 \right) \tilde{\beta}_0^{(u)}, \quad G_{deb} = \frac{\pi \kappa}{2D(1+\nu)^2} \tilde{\beta}_0 \bar{\tilde{\beta}}_0 \quad (2)$$

また、図-1のC点での応力拡大係数は $\phi(\zeta)$ から計算される [1]。

図-1(b)および(c)の応力拡大係数を $k_B^{(c)}$ 、 $k_S^{(c)}$ および $k_B^{(u)}$ 、 $k_S^{(u)}$ としたとき、図-2のC点での応

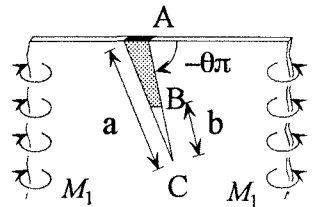


図-2

力拡大係数 K_B 、 K_S およびひずみエネルギー解放率 G_{cr} は次式で表される。

$$K_B = k_B^{(c)} - k_B^{(II)} + \frac{M_1}{M_0} k_B^{(II)}, \quad K_S = k_S^{(c)} - k_S^{(II)} + \frac{M_1}{M_0} k_S^{(II)}$$

$$G_{cr} = \frac{\pi K}{D(1+\nu)^2} (K_B^2 + K_S^2) \quad (3)$$

3. 解析結果

任意の大きさの荷重に対応するため、横軸に荷重比 M_1/M_0 又は M_0/M_1 をとり、図-2の剥離先端のひずみエネルギー解放率を $\frac{DG_{deb}}{aM_0^2}$ 又は $\frac{DG_{deb}}{aM_1^2}$ と無次元化し、 $\nu=0.25$ について図-3に示した。

ここでは剥離直後を考え、切り欠きの長さ a と剥離長さ b の比を $b/a=0.001$, 0.0005 とした。 b/a による G_{deb} の差は、ほとんどみられない。 $\theta\pi$ が小さい方が G_{deb} は大きく、剥離しやすい。 $M_1/M_0=1$ のとき 0 となり、剥離は進展しない。 $M_1/M_0=-1$ のとき G_{deb} は最大となり、最も剥離しやすいといえる。

C点のひずみエネルギー解放率を $\frac{DG_{cr}}{aM_0^2}$ 又は $\frac{DG_{cr}}{aM_1^2}$ と無次元化し、図-4に示した。 b/a による G_{cr} の差は小さい。 $\theta\pi$ が大きい方が G_{cr} は大きく、C点でクラックが発生しやすい。ただし、 $-0.5 < M_0/M_1 < 0.5$ のとき、 $\theta\pi$ が小さい方が G_{cr} は大きくなる。

$M_1/M_0=-1$ のとき G_{cr} は最大で、最もクラック発生の可能性があると見える。

4. まとめ

線状剛体を有する薄板の曲げ問題について、残留応力のある状態に、さらに荷重が載荷されたときのひずみエネルギー解放率を求めた。これにより、剥離進展の可能性の高い荷重比 M_1/M_0 がわかる。 G_{deb} 、 G_{cr} ともに $b/a=0.001, 0.0005$ による差は小さい。また、破壊靱性値が、与えられた荷重の G_{deb} や G_{cr} より大きければ、また最大値 $(G_{deb})_{MAX}$ や $(G_{cr})_{MAX}$ よりも大きければ、剥離やクラックの破壊は起こらない。よって、材料をそのように選択すればよい。剥離は $\theta\pi$ が小さい方が、クラックは $\theta\pi$ が大きい方が生じやすい。

【参考文献】

- [1] N.Hasebe and S.Inohara, "Stress Analysis of a Semi-Infinite Plate with an Oblique Edge Crack", Ingenieur-Archiv 49(1980)
- [2] 山田正俊, 長谷部宣男, 中村卓次, 三輪昌弘, 村瀬義昭, "2ヶ所変位拘束を受ける薄板の曲げ問題", 平成6年度材料力学部門講演会講演論文集(日本機械学会)
- [3] 三輪昌弘, 長谷部宣男, 中島将貴, 中村卓次, "曲げ・ねじりを受ける薄板の変位拘束端に生ずるクラックと剥離の分岐問題", 土木学会論文集 No. 525/I-33(1995.10)

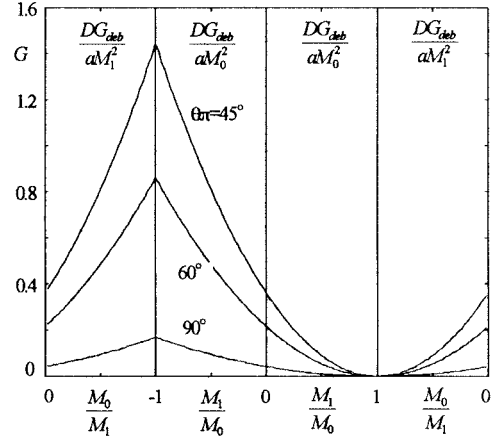


図-3

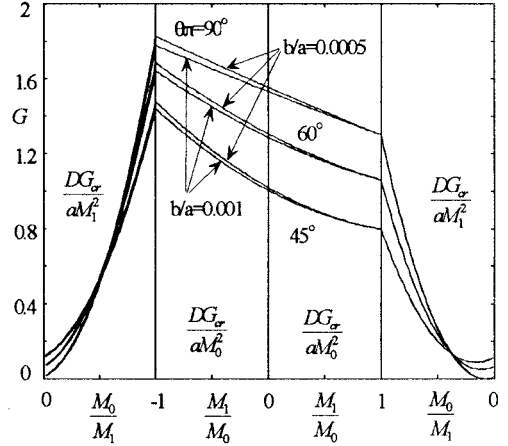


図-4