

く形剛体介在物界面のはく離進展に関する研究

中部電力(株)

○上田 稔

名古屋工業大学(院)

児島 清隆

名古屋工業大学

長谷部宣男

名古屋工業大学

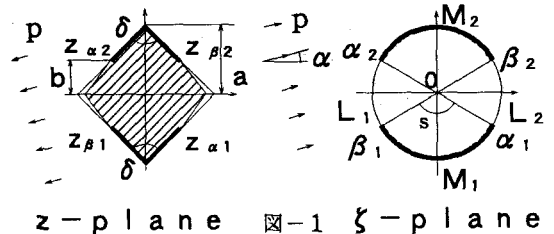
中村 卓次

1. まえがき

コンクリートの骨材とモルタルのはく離、高強度鋼の硬い介在物まわりのはく離など、材料の強度において母材と介在物の界面のはく離の問題は重要である。既に介在物を円形弾性体あるいは楕円形剛体として、界面に1ヶ所か2ヶ所のはく離がある場合の応力解析は幾つかなされている。しかし実際の介在物には角を持つ形状のものも多く存在し、その隅角点近傍における引張応力の集中により、優先的に角のある界面からはく離が発生する例が多いと考えられる。また円形及び楕円形の介在物の場合、はく離の進展とともにく離の進展方向(界面の方向)と作用荷重の方向が少しずつ変化するが、く形介在物の場合はく離の進展方向が作用荷重の方向に対し一定であり、界面のはく離の進展が円形や楕円形の介在物と異なる事も予想される。そこで、本研究はく形剛体介在物の隅角部から2ヶ所の対称なはく離が発生している状態の応力解析を平面弾性混合境界値問題として行ったものである。本解析で用いた方法によれば、介在物は剛体とするものの、比較的任意形状の介在物に対する解析が可能である。ここでは、く形介在物は対称形とし隅角部角度をいくつか変化させて解析を行い、はく離先端の特異性値を求めはく離進展に関する考察を行う。

2. 境界条件と複素応力関数

解法は、はく離の生じたく形剛体介在物周辺弾性領域を、単位円外(図-1)に写像する分数式の和の形の写像関数 $\omega(\xi)$ と複素応力関数 $\phi(\xi)$ 、 $\psi(\xi)$ を用いる方法で行う。写像関数に含まれるパラメータ δ を変化させることにより、く形の形状を変えることができる。境界条件は、弾性体



とく形の剛体が接合している境界を変位のない剛境界(M_1, M_2)、はく離が生じ弾性体とく形の剛体が離れている境界を応力自由境界(L_1, L_2)とする。荷重条件が任意方向一様荷重で、剛境界と応力自由境界が2ヶ所ずつ存在する混合境界値問題に対する複素応力関数 $\phi(\xi)$ の一般解は既に報告した【1】。

3. 応力分布

介在物の形状が正方形(図-1の $\delta=90^\circ$)、 $\kappa=2$ (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))で荷重条件がX軸方向一様引張の場合(図-1の $\alpha=0^\circ$ 、 $p>0$)とY軸方向一様圧縮の場合($\alpha=90^\circ$ 、 $p<0$)に対し、それぞれはく離発生前($b/a=0.0$ 、図-2, 4)とはく離発生後($b/a=0.5$ 、図-3, 5)の応力分布を示す。図-2, 4よりはく離発生前には、引張荷重の場合は荷重方向に面する隅角部(S点)近傍に急激な引張応力の集中が、圧縮荷重の場合には荷重方向と直交する隅角部(S点)近傍に圧縮荷重によってもたらされる引張応力の集中がみられ、界面のはく離が発生しやすいことがわかる。はく離発生後は、はく離先端で急激な応力集中がみられる(図-3, 5)。

4. はく離先端の特異性値

複素応力関数 $\phi(\xi)$ の一階微分に対し、はく離先端の特異性値は無次元化した形で次式のように表される。

$$F = \frac{|\widehat{\beta}_0|}{p\sqrt{a}} \quad \widehat{\beta}_0 = \frac{|\omega'(\beta_1)(\beta_1 - \alpha_1)|^m g(\beta_1)}{\omega'(\beta_1)(\beta_1 - \alpha_1)} \exp[-im(\pi - s/2)]$$

ここに $g(\beta_1) = [g(\xi)]_{\xi=\beta_1} = [\phi'(\xi)(\xi - \alpha_1)^{1-m}(\xi - \beta_1)^m]_{\xi=\beta_1}$ 、 $m = 0.5 - i(\ln \kappa)/(2\pi)$

s は図-1の ξ -planeにおいて $s = \arg(\alpha_1) - \arg(\beta_1)$ 、 α_1, β_1 は単位円上のはく離先端に

対応する点である。

無次元化したはく離先端の特異性値 F とはく離の大きさを示す値 b/a ($0 \leq b/a \leq 1$) の関係を、く形剛体介在物の角度 δ (図-1) ごとに、 $\kappa = 2$ のときで荷重条件として X 軸方向一様引張の場合と、 Y 軸方向一様圧縮の場合を図-6 に示した。 X 軸方向一様引張の場合、 F 値は $\delta = 120^\circ \sim 150^\circ$ の場合は極値を有し、あるいははく離の大きさでははく離の進展が止まる可能性があるが、 $\delta = 30^\circ \sim 90^\circ$ の場合は単調増加し、一旦はく離が発生すると介在物の全周にわたってはく離が発生することがわかる。 Y 軸方向一様圧縮の場合は δ の大きさに関わらず F 値は単調増加を示し、一旦はく離が発生すると介在物の全周にわたってはく離が発生することがわかる。よって、介在物に起因する材料強度の低下を防ぐには、界面の接着性を高めることが必要であるといえる。

F 値について圧縮荷重の場合と引張荷重の場合を比較すると、圧縮荷重の場合ははく離進展するにつれて徐々に F 値が大きくなるのに対し、引張荷重の場合は比較的小さなはく離で F 値が大きくなっており、はく離がある大きさになるまでは圧縮荷重による F 値より大きい (この範囲は隅角部角度 δ が大きいほど広い)。

このことから引張荷重の場合、圧縮荷重の場合に比べ初期欠陥としての母材と介在物の界面の非接着部が比較的小さくても、界面のはく離進展については材料の強度に及ぼす影響が大きいと考えられる。

文献【1】児島、上田、長谷部、中村、1990、応用力学連合講演会予稿集

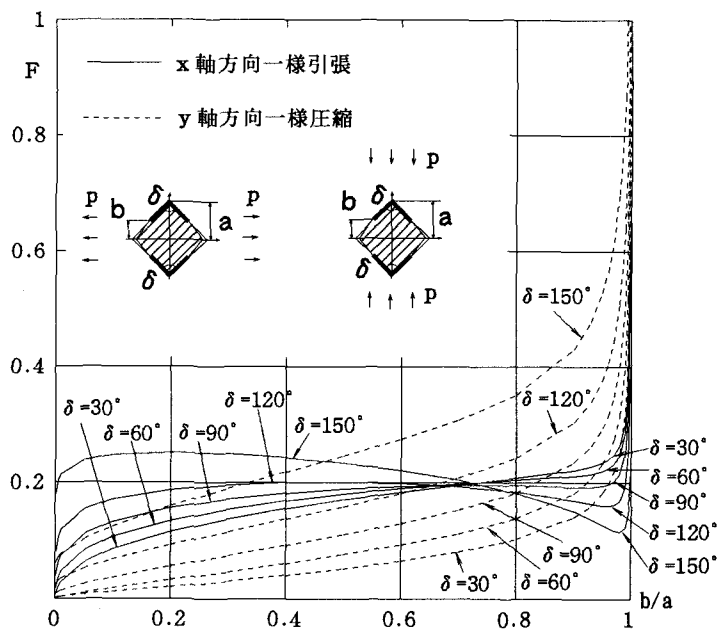


図-6 はく離先端の応力特異性値

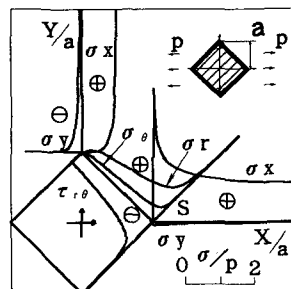


図-2 X軸方向一様引張
はく離発生前 ($b/a=0.0$)

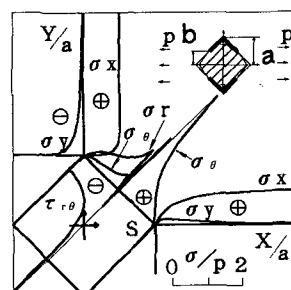


図-3 X軸方向一様引張
はく離発生後 ($b/a=0.5$)

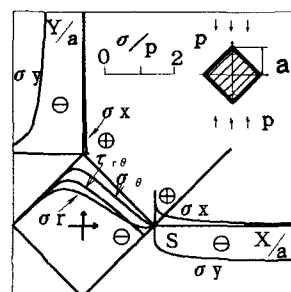


図-4 Y軸方向一様圧縮
はく離発生前 ($b/a=0.0$)

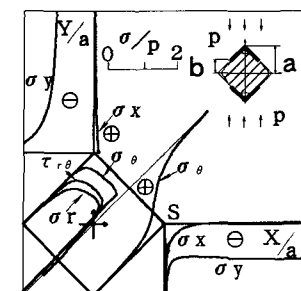


図-5 Y軸方向一様圧縮
はく離発生後 ($b/a=0.5$)