

I - 1

数値解析による岩質材料内の破壊進行領域の考察

東北大学工学部 学生員 ○郷家 光男

東北大学工学部 正 員 佐武 正雄

東北大学工学部 正 員 新関 茂

1. はじめに

コンクリート、モルタル、セラミックスなどの様な岩質材料において、巨視的クラック先端近傍に多数の微視的クラックが生じることによって形成される破壊進行領域の巨視的な破壊現象への影響が強く認識されている。したがって、この破壊進行領域を力学モデルで記述して、それによって岩質材料の破壊現象を考察する必要がある。

本研究では、破壊進行領域に損傷材料モデルを適用し、FEMによる岩質材料の一種であるコンクリートの破壊じん性試験中に生じる破壊進行領域の数値解析を行ったものである。

2. 数値解析方法

FuとEvans¹⁾によると、脆性固体中に等方的に円盤状の微視的クラックが生じていると、その弾性係数は、次のように変化する。

$$E^*/E = \nu^*/\nu = 1 - (16/9)\xi = 1/f \quad (1)$$

ここに、 E と ν は微視的クラックを含まない材料のヤング率とポアソン比、 E^* と ν^* は微視的クラックを含む材料のヤング率とポアソン比、 ξ は微視クラック密度、また、 f は弾性係数の低減率の逆数を表す。等方弾性体の構成式を式(1)によって微視的クラックを含む材料の構成式に修正して、さらに増分形にすると、構成式は次のように表される。

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{f+\nu}{E} d\sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} d\sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{df}{E} \sigma_{ij} \quad (2)$$

ここに、 $d\varepsilon_{ij}$ 、 σ_{ij} 、 $d\sigma_{ij}$ 、および、 df はひずみ増分、応力、応力増分、および、弾性係数の低減率の逆数の増分である。

破壊進行領域では、損傷は一定の状態ではなく連続かつ不可逆的に変化しているので、この変化していく損傷を定式化しなければ、損傷材料モデルを破壊進行領域に適用することはできない。以下、変化していく損傷を表した式を損傷の発展式と呼ぶことにする。ここでは損傷の発展式、すなわち、微視クラック密度の発展式は次のように仮定した。

$$\begin{aligned} f(\sigma_{ij}) < 0 & \quad \text{のとき} \quad d\xi = 0 \\ f(\sigma_{ij}) \geq 0, d\varepsilon_v > 0 & \quad \text{のとき} \quad d\xi = a_1 d\varepsilon_v \\ f(\sigma_{ij}) \geq 0, d\varepsilon_v < 0 & \quad \text{のとき} \quad d\xi = a_2 d\varepsilon_v \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $d\varepsilon_v$ と $f(\sigma_{ij})$ は体積ひずみ増分と破壊規準を修正した微視的クラックの発生条件、 $a_1(>0)$ 、 $a_2(<0)$ は比例定数である。ここでは、 $f(\sigma_{ij})$ にChenら²⁾がコンクリートに対して提案した関数を用いた。式(2)から得られる剛性方程式は破壊進行領域の広がり要素1個分とする荷重に対する増分法によって解かれた。

また、巨視的クラック進展の規準となるパラメータとして、 J 積分を拡張した次式の $\hat{J}$ 積分を採用した³⁾。

$$\hat{J} = - \int_{\Gamma} T_i u_{i,1} d\Gamma + \int_A \sigma_{ij} \varepsilon_{ij,1} dA \quad (4)$$

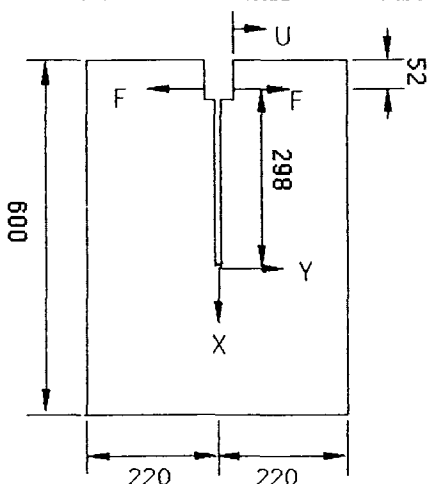


図-1 DCB供試体

ここに、 Γ 、 A 、 T 、および、 u は巨視的クラックの進展に比べて十分に大きい径路、 Γ が囲む領域、表面力、および、変位である。

3. 数値解析結果

図-1 に示した DCB 供試体に生じる破壊進行領域の解析結果について述べる。実際の解析では、図-1 の右半分の領域に対して行った。用いた材料定数は、 $E=3250$ (kgf/mm^2)、 $\nu=0.2$ 、 $a_1=1331$ 、 $a_2=-441$ 、 $\sigma_t=0.115$ (kgf/mm^2)、 $\sigma_c=1.150$ (kgf/mm^2)、 $\sigma_{bc}=1.334$ (kgf/mm^2) である。ここで、 σ_t 、 σ_b 、 σ_{bc} は一軸引張、一軸圧縮、二軸圧縮での微視的クラック発生応力である。図-2 は計算で求められた荷重 (F) と荷重点変位 (U) である。図-3 は巨視クラック先端の破壊進行領域中の微視クラック密度の Contour Line を描いたものである。図中の線は一番外側が $\xi=0.02$ で、内側に向かって 0.02 間隔で描かれており、一番内側は $\xi=0.2$ を示している。ただし、巨視的クラック先端近傍では ξ が一様に見えるが、数値解析結果は巨視的クラック先端に向かって ξ は増加している。この図によりクラック密度を通して破壊進行領域の二次元的かつ連続的な進展の様子が示されている。これを見ると、巨視的クラックがわずかに進んだとき、 $\xi=0.02$ 等の低密度領域の Contour Line はリガメント方向への進行が巨視的クラック進展前よりも弱まり、その分巨視クラック進展前よりもリガメント直交方向に大きく広がろうとしている。これは、この段階では破壊進行領域は直交方向に対して成長段階であり、巨視的クラックは安定成長条件に至っていないことを示している。

4. あとがき

コンクリートの破壊じん性試験中における破壊進行領域の形成に関する数値解析結果を示した。紙面の都合上省略したが、実験データとの比較は当日発表する予定である。

参考文献

- 1) Fu, Y. and Evans, G., Some Effects of Micro-Cracking in Brittle Solids, *Acta metall.*, Vol. 35, No. 7, pp. 1515-1523, 1985
- 2) Chen, A.C.T. and Chen, W.F., Constitutive Relation for Concrete, *J. Eng. Mech.*, ASCE, Vol. 101, No. 4, pp. 465-481, 1975
- 3) 岸本喜久雄, 青木繁, 坂田勝, き裂の進展挙動を記述するための破壊力学パラメータについて, 日本機械学会論文集(A編), 46巻, 410号, pp. 1049-1061, 1980

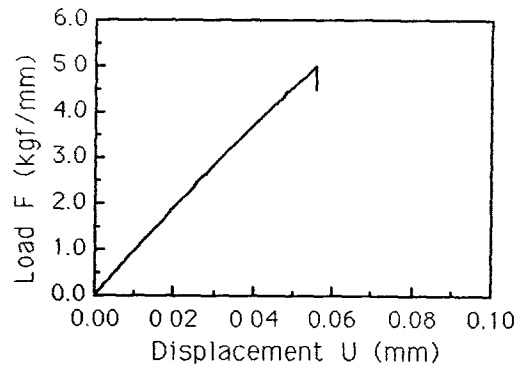


図-2 荷重-荷重点変位曲線

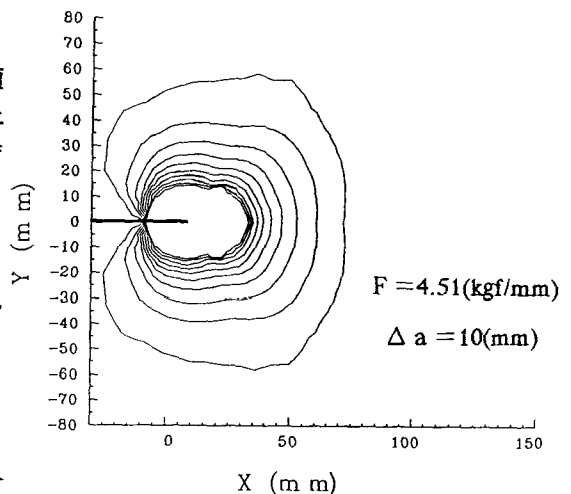
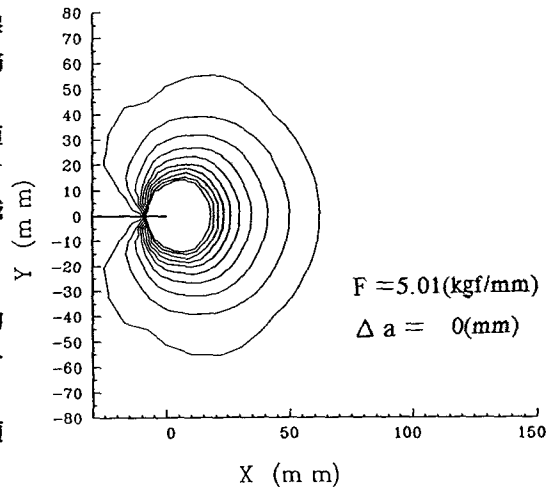


図-3 破壊進行領域の広がり