土木学会第46回年次学術講演会（平成３年９月）

I-26　岩質材料内の破壊進行領域の数値解析

清水建設　正員　○郷家　光男
東北大学工学部　正員　新関　茂
東北学院大学工学部　正員　佐武　正雄

1．はじめに

コンクリートやモルタル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生じる多数の微視的クラック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。しかしながら，材料内部の破壊進行領域３次元的観察方法は，ＡＥやＸ線などによる方法に限られ、観察結果も少数であるため，まだ，破壊進行領域が巨視的破壊現象に及ぼす影響には不明確な点が多い。

本文は、破壊進行領域に損傷材料モデルを適用し、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２次元的な有限要素解析を行い，ＡＥ位置標定結果と比較したものである。

2．数値解析方法

Fu と Evans[1] によれば、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場合、その弾性係数は、次のように変化する。

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

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である。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れば、構成式は次のように表される。

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

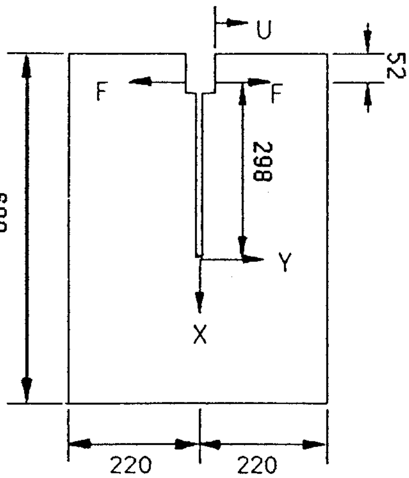
ここに、$d\varepsilon_{ij}$、σ_{ij}、$d\sigma_{ij}$、および、dfはひずみ増分、応力、応力増分、および、弾性係数の低減率の逆数の増分である。破壊進行領域では、損傷は一定の状態ではなく、荷重の増加に伴って連続かつ不可逆的に変化しているので、損傷の変化を表す関係式（以下，損傷の発展式と呼ぶ）を定式化する必要がある。ここでは，ＡＥ発生頻度と体積歪ε_vなどの関係を考慮し、損傷すなわち、微視クラック密度の発展式を、次のように仮定した。

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

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。$f(\sigma_{ij})$ には、Chen ら[2] がコンクリートに対して提案した破壊規準を修正したものを用いた。式(2)を用いて導かれる有限要素法の剛性方程式は、破壊進行領域の広がりを要素１個分とする荷重増分法によって解析をおこなった。

また、巨視的クラック進展の規準として、Ｊ積分を拡張した次の$\hat{J}$積[3]分を用いた。

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



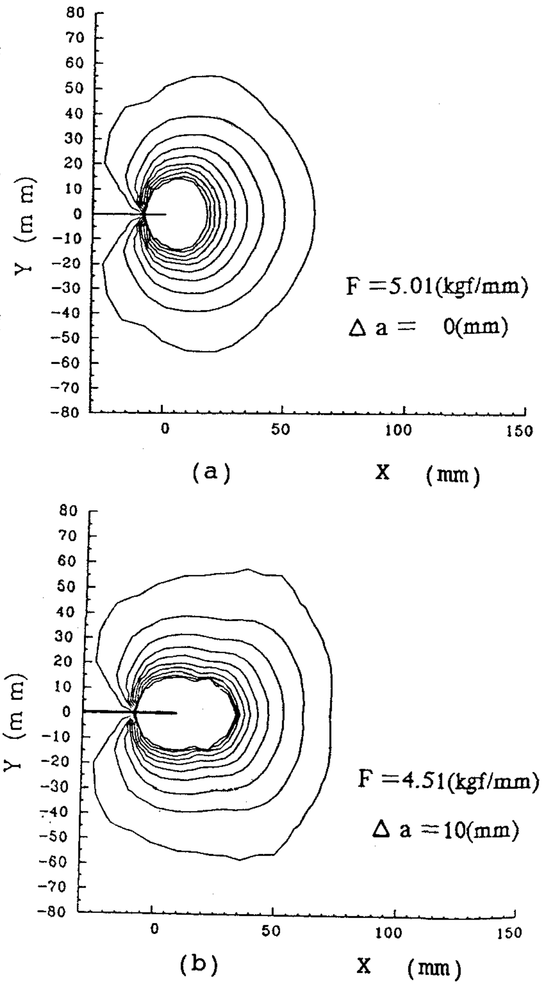
図―１　ＤＣＢ供試体　(mm)

ここに、Γ、A、T_i、および、u_i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。

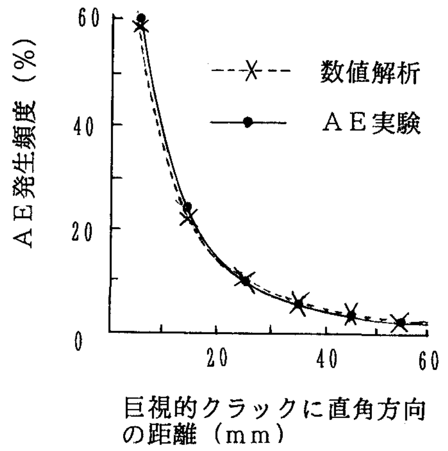
３．数値解析結果

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。数値解析に用いた定数は、$E=3250\cdot(kgf/mm^2)$、$\nu=0.2$、$a_1=1331$、$a_2=-441$、$\sigma_t=0.115(kgf/mm^2)$、$\sigma_c=1.150(kgf/mm^2)$、$\sigma_{bc}=1.334(kgf/mm^2)$である。ここで、$\sigma_t$、$\sigma_b$、$\sigma_{bc}$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(a)と(b)は、巨視的クラック進展長Δaが、０と10mmの場合の巨視クラック先端近傍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。巨視的クラック先端近傍では、ξのContour Lineは省略されているが、数値解析結果はで巨視的クラック先端に向かってξは増加している。この図には、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。図－２より、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、その分だけ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のが観察される。また、この段階では破壊進行領域は、巨視的クラックと直交方向に対して成長段階にある。

図－３は、微視的クラック密度がＡＥ発生頻度に対応するものとして、巨視的クラックと直向方向の数値解析結果と最大骨材粒径が 30 mmのコンクリートの破壊靱性試験におけるＡＥ位置標定から求められたＡＥ発生頻度の分布を比較したものである。



図－２　破壊進行領域の広がり



図－３　微視的クラック密度とＡＥ発生頻度

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