

I - 26

無筋コンクリート梁における破壊進行領域形成過程のFEM解析

東北大学工学部 学生員 ○武川 啓悟

東北大学工学部 正 員 新関 茂

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、現在のところ、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、3点曲げコンクリート供試体の破壊靱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ったものである。

2. 数値解析方法

Fu と Evans²⁾ によれば、脆性個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。

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

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 は微視的クラック密度、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。

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

ここに、 $d\varepsilon_{ij}$ 、 $d\sigma_{ij}$ 、 $d\sigma_{kk}$ 、及び、 df はひずみ増分、応力、応力増分、及び、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発生頻度と体積ひずみ ε_v などの関係を考慮し、損傷、すなわち、微視的クラック密度の発生を、次のように仮定した。

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

ここに、 $d\varepsilon_v$ と $f(\sigma_{ij})$ は体積ひずみ増分と破壊基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らがコンクリートに対して提案した破壊基準を修正したも

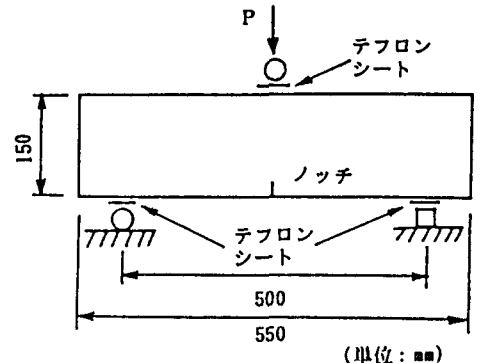


図-1 無筋コンクリート梁の3点曲げ試験

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要素1個分とする荷重増分法によって解析を行った。また、巨視的クラック進展の基準として、J積分を用いた。

3. 数値解析結果

図-1に示した3点曲げ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、 $E=3250(\text{kgf/mm}^2)$, $\nu=0.2$, $a_1=1331$, $a_2=-441$, $\sigma_t=0.115(\text{kgf/mm}^2)$, $\sigma_c=1.150(\text{kgf/mm}^2)$, $\sigma_{bc}=1.334(\text{kgf/mm}^2)$ である。ここで、 σ_t , σ_c , σ_{bc} は一軸引張り、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、供試体の対称性を考慮し、解析に用いた三角形定ひずみ有限要素による分割パターンの右側半分を示したものである。クラック進展経路及び支点の近傍は応力集中の生じる部分であることを考慮し、小さな有限要素を使用している。巨視的クラックの進展に伴って、破壊進行領域は巨視的クラックの先端方向に拡大してゆく。図-3は、数値計算結果の一例として、ノッチの長さが下側から40mmの段階において、クラックが進展するまでに、新しく形成される破壊進行領域内の微視的クラック密度(ξ)のCenter Lineを描いたものである。図中の線は、一番外側が $\xi=0.04$ で、内側に向かって0.02間隔で描かれており、一番内側は $\xi=0.20$ を示している。巨視的クラック先端近傍では、 ξ のCenter Lineは省略されているが、数値解析結果では、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。

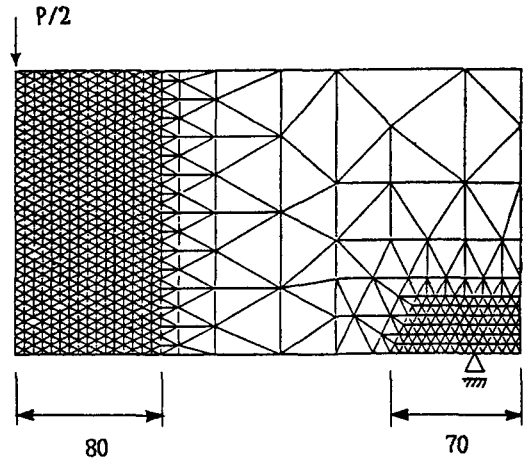


図-2 有限要素分割

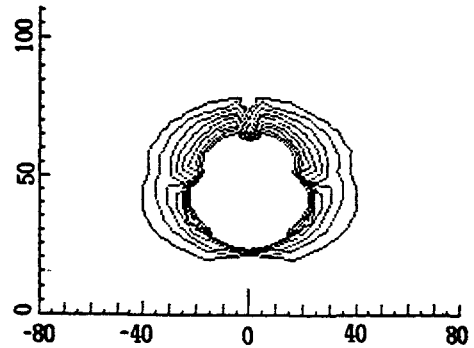


図-3 破壊進行領域の広がり

参考文献

- 1) 筑井, 新関, コンクリート内部における破壊進行領域のモデル化とその解析、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集I, pp.984-985, 1992
- 2) Fu, Y, and Evans, G., Some Effects of Microcracking in Brittle Solids, Acta metal., Vol.35 No.7, pp.1515-1523, 1985
- 3) Chen, A.C.T and Chen, W.F., Constitutive Relation for Concrete, J. Eng. Mech., ASCE, Vol.101, No.4, pp.465-481, 1975
- 4) P.G.Charalambides, and R.M.McMeeking, Finite Element Method Simulation of Crack Propagation in a Brittle Microcracking Solid, Mechanics of Materials 6, pp.71-87, 1987