

I-15 FEMによるコンクリート内部の破壊進行領域の解析

東北大学大学院 学生員 ○黒田 孝貴
 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

最近、コンクリート内の目視可能な巨視的クラック先端の近傍には、多数の微視的なクラックが生じる破壊進行領域が存在することが強く認識され、このような領域を考慮したfictitiousモデルなどが提案されている。しかしながら、現在、破壊進行領域の観察方法は、AEやX線などの方法に限られており、破壊進行領域の形状や規模に関する実験観察データも極めて少数である。

上記のような状況を考慮し、本研究は、FEMを用いて、コンクリートの破壊靱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

数値解析における破壊進行領域の構成則は、 F_u ら¹⁾に基づき、微視的クラック密度 ξ と等価応力 σ ($= \sqrt{\sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij}}$) の関係として、次式によって支配されるものとする。

$$\begin{aligned} \sigma_c < \sigma_c & \quad \text{のとき} \quad \xi = 0 \\ \sigma_c \leq \sigma_c \leq \sigma_s & \quad \text{のとき} \quad \xi = \lambda (\sigma_c - \sigma_c) \\ \sigma_c > \sigma_s & \quad \text{のとき} \quad \xi = \lambda (\sigma_s - \sigma_c) = \xi_s \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 σ_c は、微視的クラックが発生し始める応力値であり、 σ_s は、微視的クラック密度が飽和する値、 ξ_s は、その飽和値である。 $\sigma_c \leq \sigma_c \leq \sigma_s$ の応力レベルにおいて、 ξ は、 $(\sigma_c - \sigma_c)$ に比例して増加し、その比例係数が λ である。ただし、微視的クラックは、最大主応力値が引張りである領域にのみ生じると仮定する。

BudianskyとO'Connell²⁾によれば、微視的クラックの存在により、弾性定数は、次式のように変化する。

$$E^*/E = \nu^*/\nu = 1 - (16/9)\xi = 1/f \quad (2)$$

ここに、 E^* 、 ν^* は、微視的クラック発生後のヤング率とポアソン比である。また、 f は、ヤング率とポアソン比の変化率の逆数であり、 σ_c の関数である。2次元等方線形弾性体の平面歪状態の構成則を式(2)に従って修正し、破壊進行領域における構成則として次式を得る。

$$\varepsilon_{ij} = \{ (f + \nu) / E \} \cdot (\sigma_{ij} - \nu^* \sigma_{kk} \delta_{ij}) \quad (3)$$

図-3は、式(1)、(2)、(3)に従って、応力歪曲線を示したものである。式(3)を基礎とする非線形剛性方程式は、破壊進行領域形状の広がり要素1個分に限定した、荷重に対する増分法で解析された。

巨視的クラック先端から十分に離れた、破壊進行領域を通らない積分路から計算されるJ積分(J)は、破壊靱性の増加を評価する。

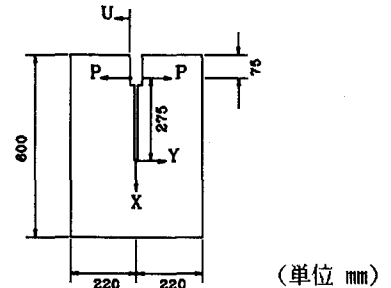


図-1 DCB供試体

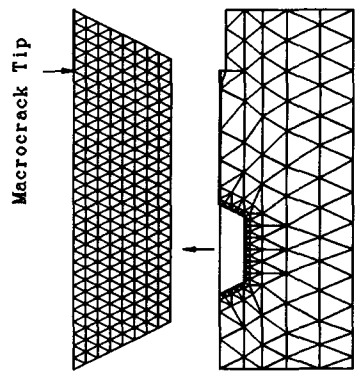


図-2 有限要素メッシュ分割図

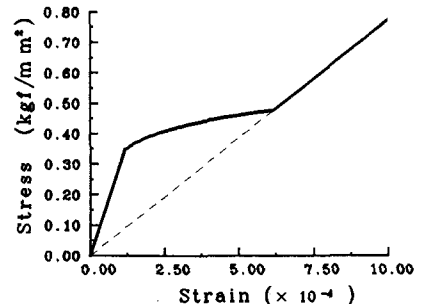


図-3 応力-歪曲線

また、巨視的クラック先端を囲む任意小の積分路から計算されるJ積分 (J^*) を用いて、巨視的クラック伝播の規準とする。このとき、積分径路がすべて微視的クラックの飽和領域に含まれる場合、 J^* は、巨視的クラックの応力拡大係数 K_I^* と次式の関係にある。

$$J^* = \{ (1 - \nu_s^2) / E_s \} (K_I^*)^2 \quad (4)$$

ここに、 ν_s 、 E_s は、微視的クラック飽和後のポアソン比とヤング率である。

3. 数値解析結果

図-1 に示す DCB (Double Cantilever Beam) に生じる破壊進行領域の解析結果について述べる。図-2 は、図-1 の供試体の右半分に対する要素分割図 (635要素、352節点、673自由度) であり、定ひずみ三角形要素を用いている。使用した材料定数値は、 $E=3100.(\text{kgf}/\text{mm}^2)$ 、 $\nu=0.2$ 、 $\sigma_c=0.39392(\text{kgf}/\text{mm}^2)$ 、 $\lambda=5.7702(\text{mm}^2/\text{kgf})$ 、 $\xi_s=0.4$ である。このとき、応力歪曲線は、図-3 で示される。

図-4 は、計算された荷重 (P) と荷重点変位 (U) の関係を示している。図-5 は、巨視的クラック先端近傍の微視的クラックの進行領域を示した図であり、有限要素メッシュを通して、破壊進行領域の連続的な進展のようすが示されている。安定な巨視的クラック成長条件が達成されるまで、破壊進行領域の幅は、実際に増加することが観察できた。この幅は、図-6 に示されるように、巨視的クラック伝播長さが30mmのときに、ほぼ最大領域高さまで増加した。

図-7 は、FEM解析の有限要素伝播により得られた R-曲線を示したものである。実際の数値解析結果は、図に記号で示されており、滑らかな曲線は、明白のために引いてある。この結果は、巨視的クラック伝播に伴った、微視的クラッキング材料に対する靱性の増加を示している。

4. あとがき

コンクリートの破壊靱性試験中における、破壊進行領域の影響による靱性の増加などについて、著者らが行った数値計算結果を示した。紙面の都合上省略したが、上述の結果は、現在知られている実験データと概ね対応した傾向となっている。これらの実験データとの対応については、当日説明する予定である。

参考文献

- 1) Y.Fu and A.G.Evans: Some Effects of Microcracks on the Mechanical Properties of Brittle Solids (I.Stress Strain Relations), Acta metall, Vol.33, No.8, pp.1515-1523, 1985.
- 2) B.Budiansky and R.J.O'Connell: Elastic Moduli of a Cracked Solid, Int.J.Solids Structures, Vol.12, (1976), pp81-97, 1976.

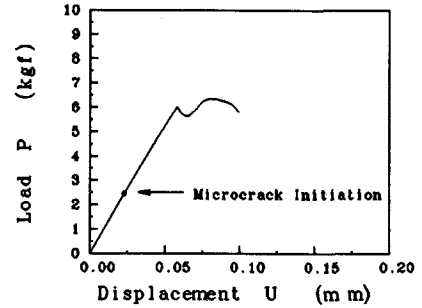


図-4 荷重-荷重点変位曲線

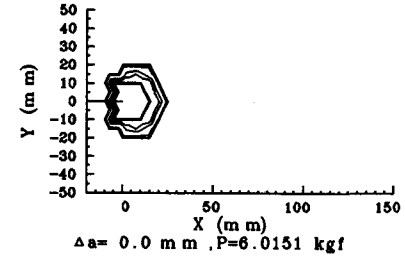


図-5 破壊進行領域

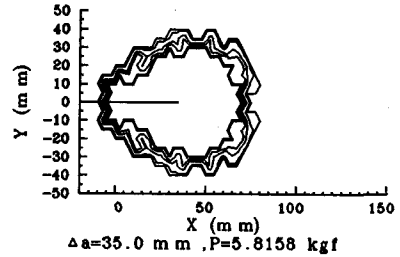


図-6 破壊進行領域の高さの変化

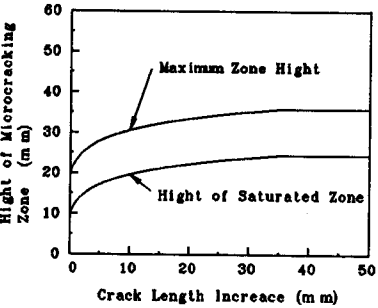


図-7 R-曲線