

V-12

異方性を考慮した損傷理論によるコンクリート内のクラック進展の解析

東北大学工学部 学生員 ○飯沼 将之
東北大学工学部 正員 新関 茂

1. まえがき

コンクリート、セラミックス、岩盤などのような不均質な脆性材料では、巨視的クラックの近傍には、多くのマイクロクラックの発生によって損傷を受けた破壊進行領域が存在することが知られている。観察方法が、 ΔE やX線などに限られるため、破壊進行領域については不明確な点も多いが、巨視的クラック先端の応力場に支配されるので、この破壊進行領域内のマイクロクラック面の方向は等方ではなく、巨視的クラックの方向に依存した異方性的な分布を考えると考えられる。しかし、近年、当初金属材料に対して適用されて発展してきた損傷力学を、コンクリートなどの準脆性材料に適用しようとする様々な試みが行われ、その力学的挙動に関して様々なモデルが提案されている。

本研究は、Kachanov¹⁾らの提案する、異方性を考慮した損傷モデルを用いて、それに損傷の発展則を導入し、有限要素法によりコンクリートのクラック進展を解析し、考察したものである。

2. 損傷モデルの概要

マイクロクラックのモデルとしては、図-1に示すような、閉じることのないと仮定した楕円形のクラックとして考え、それが対象とするコンクリート内部に分布しているとした。ここで、このようなコンクリートの弾性ポテンシャル $f(\sigma)$ を次のように定義した。

$$f(\sigma) = f_0(\sigma) + \Delta f \quad (1)$$

$$f_0(\sigma) = \frac{1}{2E_0} [(1 + \nu_0)tr(\sigma \cdot \sigma) - \nu_0(tr\sigma)^2] \quad (2)$$

$$\Delta f = \frac{1}{2E_0} \{ p[4tr\sigma \cdot \sigma - (tr\sigma)^2] + 2\sigma \cdot \sigma : (\beta - pI) \} \quad (3)$$

ここに、 $f_0(\sigma)$ は損傷のない弾性体の弾性ポテンシャルを表し、 Δf はクラックが生じたことによる弾性ポテンシャルの変化分を表している。 E_0, ν_0 はそれぞれ損傷のない弾性係数、ポアソン比を表し、 p はマイクロクラック密度を表す。また、 β は p を含む2階の損傷テンソルで、図-1より、

$$\beta = \frac{\pi}{A} \sum (a^2 nn + b^2 mm)^{(k)} \quad (4)$$

(A : 考える領域の面積)

(k は k 番目のクラックを表す)

で表される。なお、ベクトルの積はダイアド積を表す。

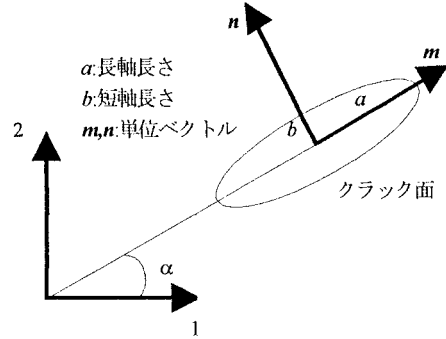


図-1 マイクロクラックのモデル

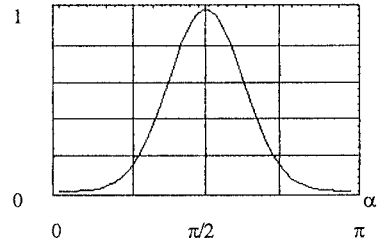


図-2 クラック面の方向分布

この損傷テンソル β は、クラック面の長軸と短軸の比や、クラック面の方向 α によって異方性を表現するテンソルで、クラック面の方向 α の分布は、図-2に示す形状のものを用いた。

このように定義した弾性ポテンシャルより、 $\epsilon = \partial f(\sigma) / \partial \sigma$ を求め、2次元平面応力状態における直交異方性の弾性係数を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{E_1}{E_0} &= \frac{1}{1 + p + 2\beta_{11}}, & \frac{E_2}{E_0} &= \frac{1}{1 + p + 2\beta_{22}} \\ \nu_{12} &= \frac{\nu_0 + p}{1 + p + 2\beta_{11}} \\ \frac{G_{12}}{E_0} &= \frac{1}{2[(1 + \nu_0) + 2p + \beta_{11} + \beta_{22}]} \end{aligned} \quad (5)$$

損傷の発展則は以下のような損傷の発生条件より定めた。

$$F(\sigma_y, p) = f(\sigma_y) - K(p) = 0 \quad (6)$$

$f(\sigma_y)$ は Chen²⁾らが提案したコンクリートの破壊規準で、 $K(p)$ は、損傷の発展に伴ってコンクリートの破壊規準が変化することを考慮するために導入した関数で、次のように定めた。

$$K(p) = a\{1 - \exp(-\mu p)\} \quad (7)$$

a, μ は損傷の発展の程度（マイクロクラックの発生の場合）を支配するパラメータで、後で述べるコンクリートの一軸圧縮破壊試験のシミュレーションにより決定される。したがって、この破壊規準において、 $F=0$ 上で $dF=0$ を満たすということから、損傷の発展式を以下のような形で導いた。

$$dp = - \left(\frac{\partial F}{\partial p} \right)^{-1} \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} d\sigma_y \quad (8)$$

3. 有限要素法による解析と考察

これまでに述べてきたモデルを用いて、有限要素法によるシミュレーションを行った。このモデルにおいては構成則が非線形になるため、Newton-Raphson 法を用いた荷重漸増法により解析を行った。

まず、コンクリート一軸圧縮破壊試験のシミュレーション結果を示す。図-3は応力-ひずみ関係を表し、図-4は横方向の弾性係数 (E_x)と縦方向の弾性係数 (E_y)との比の変化を表す。この解析において初期弾性係数は $275,000 \text{ kgf/cm}^2$ (圧縮破壊強度 345 kgf/cm^2) であり、式(7)のパラメータはそれぞれ、 $a=5.0, \mu=50$ である。図-3では、マイクロクラック密度の増大のために、破壊応力付近でひずみが増加しているのがわかる。また、図-4は、損傷が増大するにつれて、横方向の弾性が弱くなっていくことを表している。したがって、一軸圧縮破壊試験においては、本研究の損傷モデルでコンクリート材料の力学的挙動をうまく表すことができる。

次に、この一軸圧縮破壊試験シミュレーションでの材料パラメータを用いて、当研究室において実験されている、無筋コンクリート梁の3点曲げ試験のシミュレーションを行った結果を示す。図-5は、載荷点変位と荷重、マイクロクラック密度の関係を示したものである。実験では、荷重-載荷点変位の関係においてピーク荷重時の載荷点変位は解析結果よりもかなり多く出ているのだが、荷重のピーク以降にマイクロクラックが多く発生すると

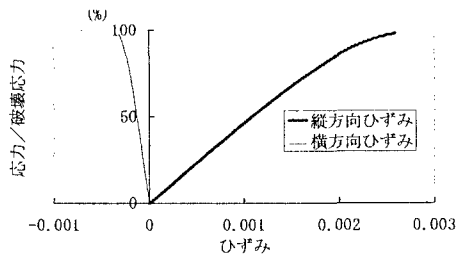


図-3 応力-ひずみ関係

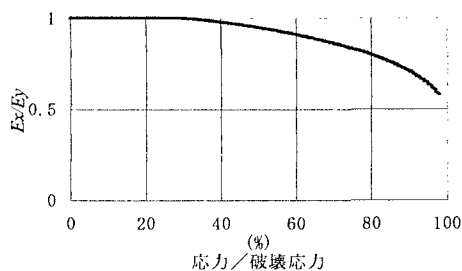


図-4 弾性係数の変化の様子

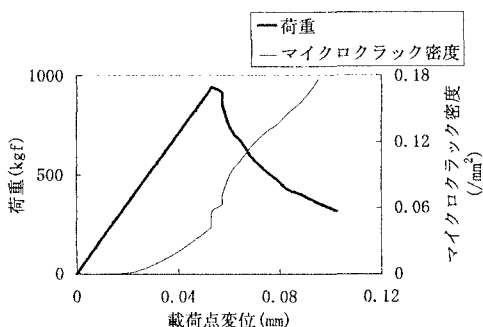


図-5 荷重・マイクロクラック-載荷点変位関係

いう現象には、よく当てはまっている。荷重-載荷点変位の関係は、微視的な損傷よりも、載荷の初期剛性にその特性が支配されるものと考えられる。

4. 参考文献

- 1) M.Kachanov, I.Tsuknov and B.Shapiro : On Anisotropy of Solids with Non-Randomly Oriented Cavities, Fracture and Damage in Quasibrittle Structures, pp.19-24, 1994
- 2) Chen, A.C.T. and Chen, W.F. : Constitutive Relation for Concrete, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.101, No.4, pp.465-481, 1975