

I - 17

結合力と広がり考慮したコンクリート内部の破壊進行領域の解析

 東北大学大学院工学研究科 学生員 ○武川 啓悟
 東北大学工学部 正員 新関 茂

 1. はじめに¹⁾

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次元の観察方法は、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。

Hillerborg等の提案した仮想ひび割れモデル²⁾は、き裂面以外は弾性領域であり、き裂面上で全ての破壊エネルギーが散逸されると仮定しているため、開口変位量が実験値と一致しないなどの問題が残る。本文は、損傷材料モデル³⁾の、微視的クラック発生による破壊進行領域形成の概念を適用し、破壊進行領域内において破壊エネルギーの一部を散逸させることで、開口変位をより現実的なものとするのが目的である。なお、解析の対象は、無筋コンクリート梁の3点曲げ载荷による破壊靱性試験であり、その際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 Evans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るとした場合、弾性係数の変化は、次のように表される

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

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（初期値）、 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。

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

ここに、 $d\epsilon_{ij}$ 、 $d\sigma_{ij}$ 、 σ_{ij} 、及び df 、はひずみ増分、応力増分、応力、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。

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

ここに、 $d\epsilon_v$ 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、荷重増加に伴い新たに損傷を受ける要素が1個となる、荷重増分法によって解

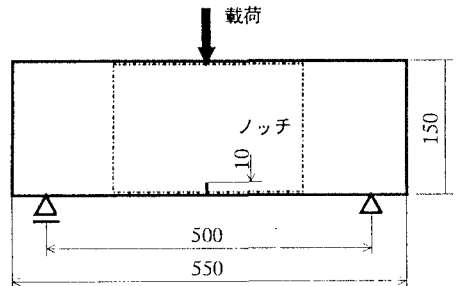


図1 3点曲げ载荷の概略（単位mm）

析した。Hillerborg等の提案する仮想ひび割れモデルは、仮想ひび割れ先端から巨視的クラック先端へと、破壊エネルギーを表す引張強度-開口変位曲線を近似した形状(図2)に結合応力を分布させることで、破壊領域を表現している。この結合力分布に関して、仮想ひび割れ先端の引張強度を、初期値のまま一定としているが、本解析では、破壊進行領域形成により、各要素の弾性係数が低下することに対し、ヤング率-材料強度の関係式を修正したものを適用し、き裂先端を表す節点の引張強度を、各荷重段階におけるヤング率より求めることで対処している。なお、仮想クラックの進展は節点の引張強度で判定し、ノッチ先端の結合力が0となったとき巨視的クラックが進展することから、以降のクラック進展は、そのときのJ積分値としている。本解析に用いた諸定数は、 $E = 3250(\text{kgf/mm}^2)$, $\nu = 0.2$, $a_1 = 1331$, $a_2 = -441$, $\sigma_t = 0.115(\text{kgf/mm}^2)$, $\sigma_c = 1.150(\text{kgf/mm}^2)$, $\sigma_{bc} = 1.334(\text{kgf/mm}^2)$, $f_t = 0.3(\text{kgf/mm}^2)$, $G_F = 0.010(\text{kgf/mm})$ 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り、 f_t は引張強度、 G_F は破壊エネルギーである。また、供試体の対称性を考慮し、片側のみ三角形定むずみ有限要素による分割を行い、解析した。

3. 数値解析結果

図3と図4は、図1の波線で囲んだ部分をクローズアップしたもので、微視的クラック密度(ξ)のContour Lineにより破壊進行領域の広がりを表現している。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 $\xi = 0.20$ を示している。図3は、従来の損傷モデルによる解析結果であり、図4は、本解析で用いたモデルによる解析結果である。共に、節点解放が、40mmまで行われており、図3では巨視的クラック、図4では仮想クラックが、それぞれ進展した状態である。図3では、巨視的クラック先端において応力集中が起こり、先端からリガメント直行方向に破壊進行領域が広がっていることが見て取れる。図4からは、結合力により仮想クラック先端の応力が分散されるため、破壊進行領域幅が狭く、全体の破壊規模も小さなものとなっている。これは、破壊エネルギーを損傷と結合力に分解した結果と思われる。詳しい結果と考察は、当日発表にて行うものとする。

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1, pp. 984-985, 1992
- 2) JCI, コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム, 第一部・委員会報告, 第4章, 1990
- 3) P. G. Charalambides, and R. M. W. Meeking, Finite Element Method Simulation of Crack Propagation in a Brittle Microcracking Solid, Mechanics of Materials 6, pp. 71-87, 1987

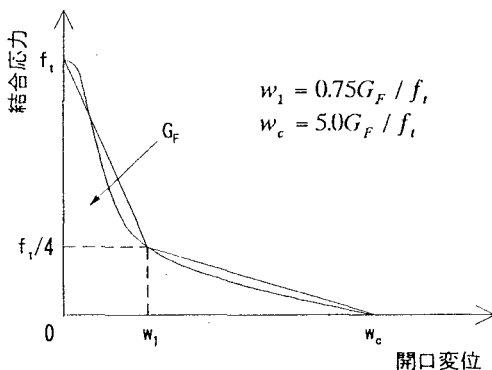


図2 破壊エネルギー曲線と2直線モデル

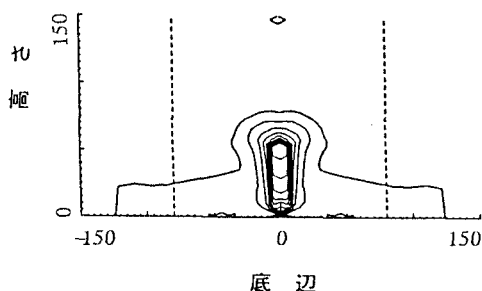


図3 結合力を考慮しない場合の破壊進行領域

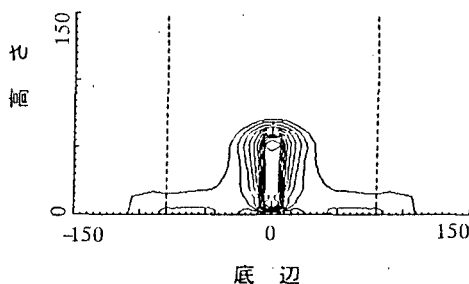


図4 結合力を考慮した場合の破壊進行領域