

I - 27

改良された損傷理論による無筋コンクリート梁内の破壊進行領域の解析

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
東北大学大学院 学生員 武川啓吾

1. はじめに

コンクリートに生じる亀裂の先端には、数多くの微視的クラックの生じる破壊進行領域が存在する。破壊進行領域を観察する方法は、A EやX線などの方法に限られているが、最近、このような実験、観察により、破壊進行領域の長さや幅についてかなり明らかにされつつある。しかしながら、微視的クラックの発生による損傷を考慮した構成則を用いて、幅も含めて破壊進行領域のモデル化を行っている研究は少ない。

本研究は、Fu¹⁾の関係式及びCharalambidesら²⁾の構成式を改良し、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次元の広がりをもFEM解析によって解析したものである。

2. 数値解析に用いる改良した構成則と損傷発展則の概要

従来、円形状の等方的に生じたクラックを含む個体の弾性係数は、FuとEvansらの研究による関係式を用いてきた。しかし本研究では、コンクリートの円柱供試体一軸圧縮試験において、破壊応力付近で、ポアソン比が急に増大することを考慮に入れるため、その中に、微視的クラック密度の関数である新たなパラメータを導入し、以下の関係式を用いた。

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

ここで、 E^* と ν^* は微視的クラック発生後のヤング率とポアソン比で、 f は弾性定数の低減率の逆数、 ξ は微視的クラック密度を表す。そして a は新たに導入したパラメータで、コンクリートの円柱供試体一軸圧縮試験に見合うように定められるものである。

この関係式を損傷のない等方弾性体の構成式に組み込み、増分形に書き表すと、

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \left\{ (f + \nu a) d\sigma_{ij} - \nu a d\sigma_{kk} \delta_{ij} \right\} + \frac{1}{E} \left\{ (df + \nu da) \sigma_{ij} - \nu da \sigma_{kk} \delta_{ij} \right\} \quad (2)$$

が得られる。 $d\varepsilon_{ij}$ は歪増分、 $d\sigma_{ij}$ は応力増分、 δ_{ij} はkronecherのデルタである。これを本数値解析における構成則とした。

損傷発展則は、従来、微視的クラック密度の増分が体積歪増分に比例するとしていたが、微視的クラックの増加による体積変化はすべて非弾性的な体積変化であるということを考慮して、以下のような損傷の発展式とした。

$$\begin{aligned} d\xi &= 0 & (f(\sigma_{ij}) < 0) \\ d\xi &= -\alpha d\varepsilon_{vd} & (f(\sigma_{ij}) \geq 0) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $d\varepsilon_{vd}$ は体積歪増分から弾性的なものを取り除いた非弾性体積歪増分で、その値は常に負（引っ張り方向）である。 α は比例定数で、 a と同様に円柱供試体一軸圧縮試験から定められるものである。 $f(\sigma_{ij})$ にはChen³⁾らが提案したコンクリートに対する破壊規準を用いた。

3. 有限要素法による解析

以上のような構成則を用いて、円柱供試体一軸圧縮試験をモデルとした要素試験（図-1）を行い、実験結果と比較することにより a の関数系と諸解析定数（表-1）を定め、無筋コンクリート梁のFEM解析を行っ

た。なお、巨視的クラックの進展条件に関してはJ積分をパラメータとして用いた。また、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個ずつ考慮する荷重漸増法によって解析を行った。

4. 数値解析結果

損傷発展則を修正した後の、微視的クラック密度の増加によるコンターラインの広がりを図-2、3に示す。亀裂はいずれも下端から1cmの、ノッチ先端から9cmのところまで伸びている。1番外側のコンターラインが $\xi=0.02$ で、内になるに従って0.02ずつ増加しているように描かれていて、図-3の最も内側のコンターラインは $\xi=0.20$ である。図-2は構成則を修正する前、すなわちパラメータ a を導入しないで数値解析を行った結果で、それに対して図-3はパラメータ a を導入したものである。両者を比較してわかるように、ノッチが短いことによる自由境界面への影響の差もあるが、パラメータ a を導入する前は亀裂近傍に向かってなだらかに微視的クラック密度が増加していて、あまり微視的クラックは発生していない。しかし、パラメータ a を導入したものは亀裂近傍付近で急激に微視的クラック密度が増加して多くの微視的クラックが発生していることがわかる。これは要素試験の結果を見てもわかるように、破壊応力付近、つまり亀裂近傍で非弾性体積歪がポアソン比の増大にともなって急増していることによるものである。この現象は、無筋コンクリート梁のAE観察実験ともよく一致している。

参考文献

- 1)Fu, Y. and Evans, G., Some Effects of Micro-cracking in Brittle Solids, Actametall., Vol. 35No. 7, pp. 1515-1523, 1985
- 2)Charalambides, P. G., and McMeeking, R. M., Finite Element Method Simulation of Crack Propagation in a Brittle Microcracking Solid, Mechanics of Materials, Vol. 6, pp. 71-87, 1987
- 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

ヤング率 E (kgf/mm ²)	2200.0
ポアソン比 ν	0.2
比例定数 α	280
パラメータ a	$a = \frac{1}{(\xi - \beta)^2} + 1 + \beta^2$
β	1.14

表-1 主な解析定数とパラメータ

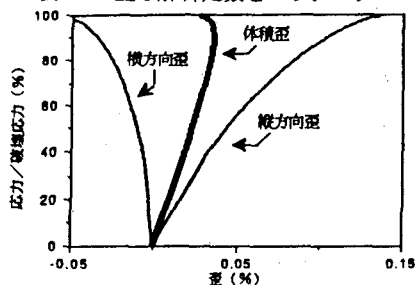


図-1 要素試験による応力-歪関係

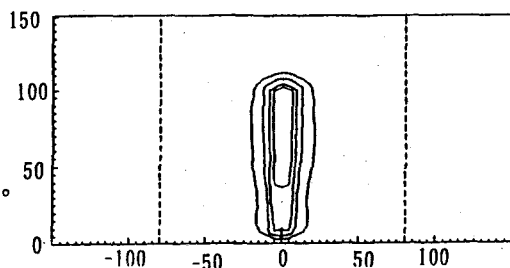


図-2 パラメータ a を導入する前の破壊進行領域の広がり

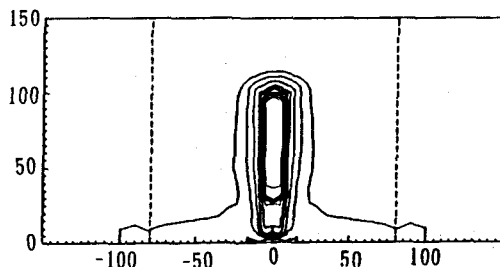


図-3 パラメータ a を導入した後の破壊進行領域の広がり