

コンクリートの引張りひび割れの有限要素モデル化について

九州大学工学部 学生会員 児玉 浩樹
九州大学工学部 正会員 John Bolander
九州大学工学部 正会員 彦坂 照

1. 緒言

エネルギーバランスによるひび割れ伝播モデルを用いれば、コンクリートの引張挙動に関する正確な予測と共に、有限要素のサイズに左右されない"objective"な解析結果が得られることが知られている¹⁾。

本研究では、最初に、これらの概念を、切り欠き入りコンクリート単純ばりに中点載荷を施した場合の実験結果と、有限要素法による数値解析結果との比較により検討してみる。次に、破壊エネルギーの設定が、数値解析結果にどの程度影響を与えるかを調べるために、ひび割れの進行経路に沿って破壊エネルギーを変化させてみる。

2. 有限要素の設定

本研究で用いる切り欠き曲げ供試体の寸法と材料特性²⁾は図-1に、この供試体に対する解析上の有限要素の設定は図-2に示してある。ここに示した2種類の有限要素の違いは、解析上の切り欠き幅によるものと、その周辺の有限要素の大きさの違いだけである。有限要素法による数値解析では、変位増分法を用いており、各変位増分において、力のつり合いの収束には、Newton-Raphson法を用いた。解析上での非線形性は、供試体の中心線上に位置する有限要素内に生じるひび割れに起因するものだけに限定される。また、これらの解析において、"Smeared(一様化) Approach"に基づき中心線上に位置する各要素内では、 1×2 の数値積分を行った。

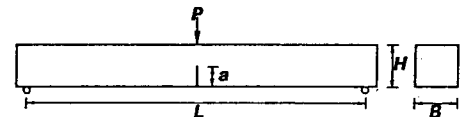


図-1 実験で用いる供試体の寸法と材料特性
引張強度: $\sigma_t = 43.13 \text{ kg/cm}^2$
ヤング率: $E = 289,000 \text{ kg/cm}^2$
ポアソン比: $\nu = 0.20$
破壊エネルギー: $G_f = 0.06 \text{ kg/cm}$

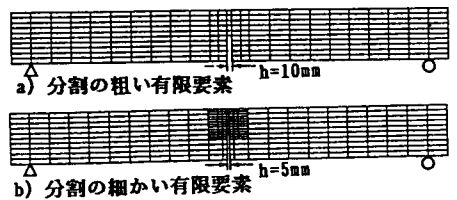


図-2 有限要素の設定

コンクリートのひび割れ面に直角な方向の引張応力-ひずみ関係は、図-3に示すように、2つの成分に分解して考えることができる³⁾。線形モデルは、ひび割れ間の連続部分のひずみを表しており、非線形ひずみ軟化モデルは、ひび割れ界面の挙動を表している。ここに示したひずみ軟化モデルは、直接引張試験の結果によく近似されており、 $\varepsilon^{\text{cr}} = \varepsilon_0$ のとき、 $\sigma = 0$ と考えるよい。

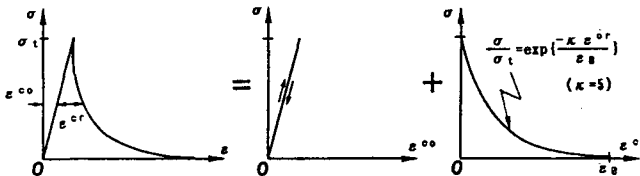


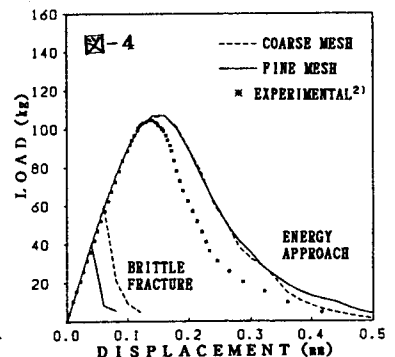
図-3 ひび割れ面に直交するひずみの分解

3. 有限要素の設定に関する"Objectivity(客観性)"の検討

図-3における ε_0 は、ひび割れが伝播する間に、適当な破壊エネルギーが消費されるように調整する。すなわち ε_0 は、次の式を満足するように定めた。

$$G_f = h \int_0^{\varepsilon_0} \sigma \, d\varepsilon^{\text{cr}} = h \sigma_t \varepsilon_0 \left\{ (1 - \exp(-\kappa)) / \kappa \right\}$$

これらの値は、解析上ひび割れが発生する要素の幅(切り欠きの幅) h に関して線形に変化する。



このようにエネルギーバランスモデルを用いて得られた"Objective"な結果を、実験結果と共に図-4に示す。

一方、ひび割れ発生後、直ちに応力を解放してしまう脆性破壊モデルを用いた場合の解析結果は、有限要素の大きさによって大きく異なっており、最大荷重は、実験結果に比べ極めて小さくなっている。

4. ひび割れ経路上の破壊エネルギーの設定による影響

先に述べたエネルギーの概念に基づくモデルでは、破壊エネルギーは、ひび割れ経路に沿って一定であると仮定した。しかしながら、ひび割れの開始に関係する破壊エネルギー、そして、より複雑な応力場が存在する載荷点近傍の破壊エネルギーは、材質自体のパラメータとしての平均化された破壊エネルギーとは、異なっていることがある⁴⁾(図-5)。

数値解析モデルにおいては、有限要素(図-2(b))の境界と一致するように選んだ範囲[1][2][3]に従って、ひび割れ経路上の破壊エネルギーを変化させるのが適当(図-5)と考えられる。ここで、パラメータ α 、 β は、この変化を定義するものであり、 $\alpha=\beta=1$ のときは、図-4に示した破壊エネルギー一定の場合と一致する。また、どのタイプにおいても、破壊が完全に終了するまでに消費するエネルギーは一定である($E_t=G_f \cdot B \cdot (H-a)$)。

図-6に実験結果と共にこれらの数値解析の結果を示す。切り欠き先端近傍の破壊エネルギーを増加させた場合($\alpha=2$)、最大荷重が増加した。一方、載荷点付近の破壊エネルギーを増加させた場合($\beta=2$)は、荷重-変位曲線の末端部において荷重減少勾配がやや緩くなった。また、破壊エネルギー一定の場合に比べて、他の場合は、ひび割れの進行経路[1][2][3]のうち[2]において破壊エネルギーが小さいので、崩壊後の荷重減少勾配が急になっている。

5. まとめ

コンクリートのひび割れの伝播をエネルギーバランスを用いてモデル化することにより、実験による変位-荷重曲線に近い解析結果が得られる。しかもそれらが有限要素のサイズに関して"Objective"であることも分かった。最初のモデルでは、ひび割れ経路上の破壊エネルギーは、一定であると仮定して解析したが、次に、解析によって得られる供試体の荷重-変位曲線が、この破壊エネルギーの変化に敏感に影響されることを示した。しかしながら、これらのエネルギーを定義するための諸量に関しては、未だ不十分な部分が多いので、更なる実験研究が必要である。

参考文献

- 1) Bazant, Z. P., and Oh, B. H., "Crack Band Theory for Fracture of Concrete," Materials and Structures, (RILEM, Paris), Vol. 16, 1983, pp. 155-177.
- 2) A. Carpinteri, et al., "Numerical Simulation of Concrete Fracture Through a Bilinear Softening Stress-Crack Opening Displacement Law," SEM/RILEM Int. Conf. on Fracture of Concrete and Rock (eds. S. P. Shah, and S. E. Swartz), Houston, June 1987.
- 3) de Borst, R., and Nauta, P., "Non-orthogonal Cracks in a Smeared Finite Element Model," Engineering Computing, Pineridge Press Ltd., Vol. 2, March 1985, pp. 35-46.
- 4) A. Bascoul, et al., "Concerning the Measurement of the Fracture Energy of a Micro-Concrete According to the Crack Growth in a Three Points Bending Test on Notched Beam," SEM/RILEM (参考文献²⁾に同じ)

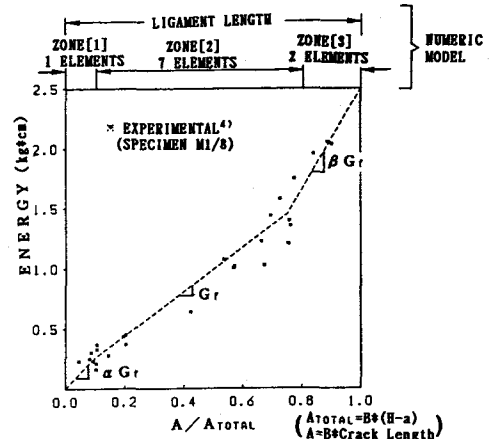


図-5 ひび割れ進行経路上の G_f の変化

