

I-107

コンクリートのひび割れ伝播経路上の破壊エネルギーの変化

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 熙

1. 緒言

破壊エネルギー G_f とは、単位面積の破壊面を形成する際に消費されるエネルギーのことである。コンクリートに関して、この G_f は、離散ひび割れモデル¹⁾、一様ひび割れモデル²⁾ のどちらにおいても、材質自体の基本的パラメータとして扱われている。今日までに報告されているほとんどすべての論文において、コンクリートの破壊エネルギー G_f は、一定のものが用いられている。

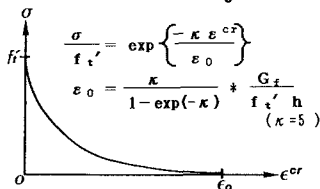
本研究では、いくつかの特定の問題(例えば、切り欠き入り無筋コンクリート単純ばりの中点に静的載荷を施した場合)に関しては、ひび割れ伝播経路上の破壊エネルギーに変化をもたせることで、より良い解析結果が得られることを示す。

2. 数値解析モデル

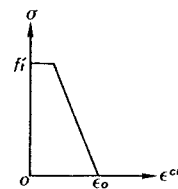
本研究で用いる切り欠き曲げ供試体の寸法と材料特性³⁾を
 図-1 に、この供試体に対する解析上の有限要素の設定を
 図-2 に示す。有限要素法による数値解析では、変位増分法を用いており、各変位増分において、力のつり合いの収束には、Newton-Raphson法を用いた。解析上での非線形性は、供試体の中心線上に位置する有限要素内に生じるひび割れに起因するものだけに限定される。また、これらの解析において、“Smeared Approach”に基づき中心線上に位置する各要素内では、1x2の数値積分を行った。

コンクリートのひび割れモデルとしては、文献⁴⁾の手法を用いたが、このうち、ひずみ軟化域として本研究では、図-3(a)に示す非線形モデルを用いた。ここに 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、すなわち ϵ_0 は、式(1)を満足するように定められる。

$$G_f = h \int_0^{\epsilon_0} \sigma d\epsilon^{cr} = h \sigma_t \epsilon_0 \{ (1 - \exp(-\kappa)) / \kappa \} \quad (1)$$



(a) nonlinear model



(b) bilinear model

図-3 ひずみ軟化域モデル

3. ひび割れ伝播経路上の破壊エネルギーの設定

本研究においては、図-4 に示すとおり、有限要素の境界と一致するように選んだ3つのゾーン⁵⁾に従って、ひび割れ伝播経路上の破壊エネルギーに変化をもたせている。

a) ZONE[1]

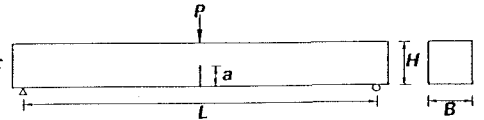
真のひび割れが発生する前に、マイクロクラックの密集部分である破壊ゾーンを形成するためのエネルギーが消費されるはずである。そして、ひとたびひび割れを形成し始めると、少ないエネルギー消費で、ひび割れが伝播してゆく。

b) ZONE[2]

この部分の G_f は、材質自体のパラメータとして考えられる。ひび割れは、ZONE[1], [2] の影響を受けずに伝播してゆく。

c) ZONE[3]

載荷点近傍の供試体内に生じる複雑な応力場のために、この部分の G_f は大きくなる。



$L \times H \times B = 800 \times 100 \times 100$ mm
 $a/H = 0.5$
 引張強度: $f_t' = 43.13$ kg/cm²
 ヤング率: $E = 289,000$ kg/cm²
 ポアソン比: $\nu = 0.20$
 破壊エネルギー: $G_f = 0.06$ kg/cm

図-1 供試体

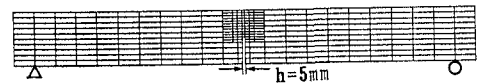


図-2 有限要素の設定

破壊エネルギー G_f は、図-4 に示した直線の勾配より式(2)で求められる。また、解析においては、最初に破壊ゾーンを形成するときに消費されるエネルギーを表すために、1 番目の有限要素内においては、図-3(b) に示す特別なひずみ軟化域と大きな G_f を用いた。

$$G_f = \text{直線の勾配} \times E_{\text{TOTAL}} / A_{\text{TOTAL}} \quad (2)$$

(E_{TOTAL} : 供試体が崩壊するまでに消費するエネルギー)

図-4 の破線は、 G_f 一定の場合を示し、ひび割れ経路上の10個すべての有限要素内で同一の G_f を用いていることになる。ひび割れの伝播が完了(供試体が崩壊、 $A/A_{\text{TOTAL}}=1$)するまでに消費されるエネルギーは、破壊エネルギーが一定の場合も 変化をもたせた場合も理論的には同じ ($E/E_{\text{TOTAL}}=1$) である。

4. 数値解析結果

G_f が一定の場合と、変化をもたせた場合の荷重-たわみ曲線の解析値を、実験値と共に図-5 に示す。 G_f に変化をもたせたモデルを用いた場合の解析結果は、最大荷重に関しては、やや大きくなったが、最大荷重後の曲線に関しては、実験結果によく近似したものが得られた。

5. まとめ

実際の構造物では、理想的な切り欠きが存在しないので、ひび割れを発生させるために必要なエネルギーは、比較的大きい場合もある。また、理想的な集中荷重のみを扱うわけではないので、載荷点近傍にはかなり複雑な応力場が存在していると思われる。このように ZONE[1], ZONE[3] で示したような影響が重要となるひび割れ問題では、破壊エネルギー G_f に変化をもたせたモデルを用いるのが適当であり、より良い解析結果を導けるとと思われる。これらの破壊エネルギーを定義するための諸量に関しては、より一層の実験研究が必要である。

参考文献

- 1) Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P.E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements," Cement and Concrete Research, Vol. 6, 1976, pp. 773-782
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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 (文献³⁾に同じ)
- 6) 児玉 他 "コンクリートの引張ひび割れの有限要素モデル化について", 土木学会西部支部大会概要集1-4, 1990, pp. 8-9

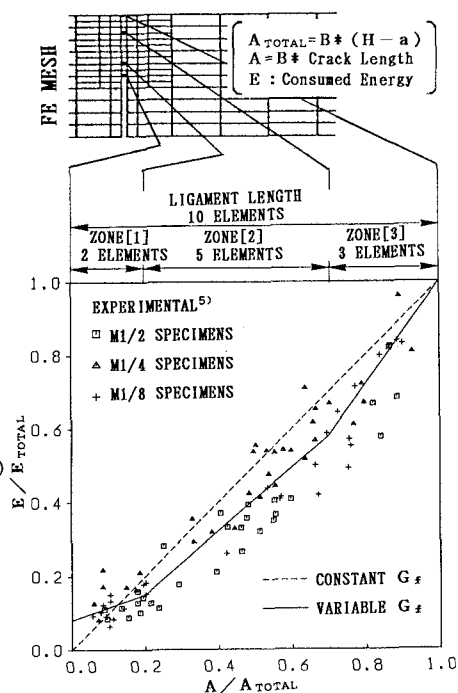


図-4 破壊エネルギーの変化

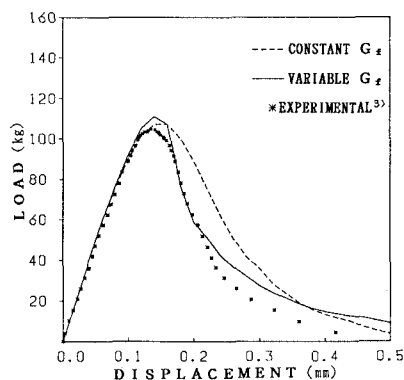


図-5 実験結果と解析結果
(応力-ひずみ曲線)