

複合脆性材料の逐次破壊過程の解析

東北大学 学 〇 山ノ内 正司
東北大学 正 佐 武 正雄
東北大学 正 新 関 茂

1. はじめに

脆性材料の圧縮時の破壊には、徹視的な破壊開始と最終破壊との間に、逐次破壊過程が存在する。本報告では、初めに、破壊の基本的な問題と考えられる、単一材料の内部スリットからのき裂の進展を解析し、き裂経路、及び進展長と荷重との対応に着目して、実験結果と比較考察する。上述の様な単一材料から成る材料でも微小部分に分割すれば、ヤング率や強度定数は同一ではないと考えられる。また、岩石やコンクリートなどは本来ランダムな力学的性質を持つ粒子より構成されている。このような場から構成粒子の位置的ランダム性や材料時性の分布を考慮して、粒子分散形複合材料をモデル化する。そして、逐次破壊過程の F.E.M. シミュレーションを通し、圧縮時の応力-変曲線などを調べ、分散相と母材の力学特性、それらの含有率、及び空隙が、強度にどのような影響を及ぼすのかも考察する。

2. き裂進展の解析

初めに、F.E.M.による解析方法について述べる。

き裂の進展条件を、以下の様に規定する。

1) 内部スリットからのき裂は、最大引張主応力が材料の引張強度に達した時に、最大引張主応力方向と直交する方向に進展する。

2) その後のき裂は、エネルギー解放率が材料の境界エネルギー解放率に等しくなった時に、エネルギー解放率が最大となる方向に進展する。⁽¹⁾

き裂先端の応力場の解析は、Wilsonの三角形特要素⁽²⁾を用い(図-1)、領域の分割は、自動分割手法を用いて行なった。

図-2に解析モデルを示す。

次に、実験は、平偏実験として、割製試験、破壊じん性試験も行ない、水-石膏比 0.6:1 の石膏に対して、引張強度 $\sigma_t = 9.7 \text{ kg/cm}^2$ 、モート I 阻層応力拡大係数 $K_{IC} = 25.3 \text{ kg/cm}^{3/2}$ が得られた。又、ヤング率は $E = 4.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比は $\nu = 0.1$ である。本実験では、AE計測を媒介にして、顕微鏡で、き裂先端の位置を、できるだけ正確に読みとった。

解析結果と実験結果を合わせてまとめたのが、図-3である。この図から、き裂経路は実験結果とほぼ一致していると考えられる。荷重については、ステップ2では実験値に近い値が得られているが、き裂が進展するにつれて、計算による荷重は倍増している。この原因としては、き裂が載荷端面に出づにつれて、非軸対称な荷重軸方向の応力が、 y 方向応力の応力の異質性に影響を及ぼしたためと考えられる。

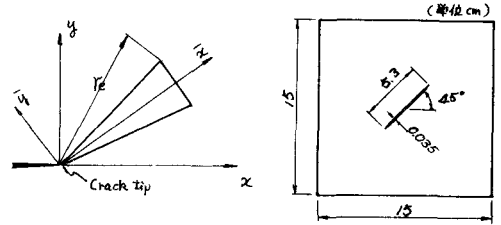


図-1 特異要素

図-2 解析モデル

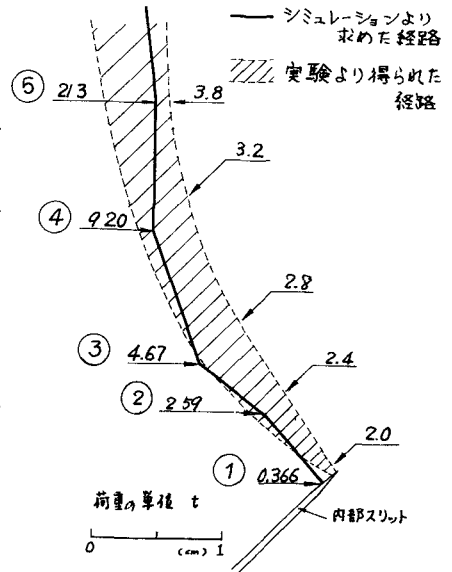


図-3 き裂経路と荷重の比較
(左側…計算値, 右側…実験値)

3. 複合脆性材料の破壊過程の解析

以下に解析方法について略述する。

①. 図-4aモデルの1要素も構成粒子と見なし、一様乱数によって要素の種類を識別し、それぞれについて、材料特性は正規分布に従うものとする。

②. 破壊条件は、Griffith理論に修正されたMohrの破壊包絡線を採用する。(図-5)

③. 破壊後の要素の構成式は、せん断型破壊の場合(図5, 円A), 破壊時の節点力を保持(鈍けるものとし、引張型破壊の場合(図5, 円B), 最大引張主応力方向の剛性を $1/100$ に低下させ、異質性化する。

④. 破壊判定は、強制変位増分 $\Delta\delta_i$ に対し、破壊要素の等価節点力の誤差が相殺されるように、次のような破壊判定ゾーンを設けた。

$$1.02 \geq 0.25(\sigma_1 - \sigma_2) / \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_2)/2} \geq 0.98$$

⑤. 解析モデルの各種構成要素のポアソン比はすべて $\nu_m = 0.15$, $\nu_d = 0.0$ とした。ここに添字mは平均, dは標準偏差を示す。(以下同様) さらに、 $\sigma_d/\sigma_m = E_d/E_m = 0.1$ と統一した。

次に結果を説明する。図-6は、強度比1:3、含有比1:1の2相複合材料の $\sigma_y \sim \epsilon$ 曲線である。同様に図-7は強度比1:2:4:6、含有比1:1:1:1の材料に5%の空隙を考慮したものである。どちらの場合も、破壊開始後、3つの曲線は、津次勾配を変えてゆき、最終破壊に近づくにつれては横至の勾配が反転している。この特性は、脆性材料に対する従来の知見と良く一致している。又、空隙が存在することによって破壊開始荷重がかなり低下していることがわかる。解析にEモデルの中で、空隙を考慮したものに比べ、引張型破壊が認められ、その要素は、空隙に隣接しているものが多い。図-8(a)に、材料特性が同じで、母材に対する強度比2の含砂量の含有率 α を変えた場合の $\sigma_y \sim \epsilon_y$ 曲線を示す。図-8(b)は式 $\sigma_{cr} = \sigma_y / \sum \alpha \sigma_{ci}$ を用いた見方を変えたものである。含有率が増加すればそれに伴い、強度も増加するが、 σ_{cr} の増加はそれ程ではない。

4. あとがき

材料 α -ランダム性を考慮した複合脆性材料の逐次破壊過程のシミュレーションによって求めた $\sigma_y \sim \epsilon$ 曲線は、従来の知見や実験結果と良く一致することがわかった。又、空隙は破壊開始荷重及び強度を低下させる。この事は、岩石やモルタルの一點圧縮試験時に、初期レベルで発生するAEと対応していると考えられる。進展過程の解析では、経路については一致しはと考えられる。最後に、実験を行うに当たり、終始協力に惜まなかった東大工学部土木工学科の清水君に感謝する。

参考文献 (1) R. J. Nuismer, Int. J. Fracture, Vol. 11, No. 2, 1975; (2) W. K. Wilson, Methods of Analysis and Solutions of Crack Problems, Noordhoff, Netherlands

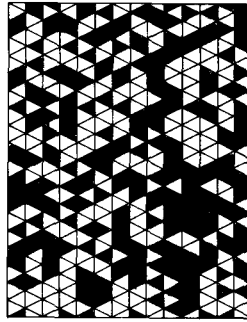


図-4 分割図

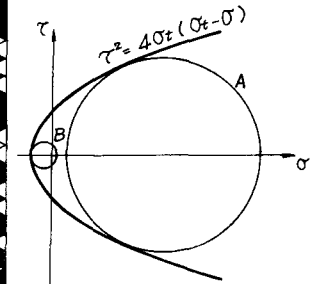


図-5 Mohr破壊包絡線

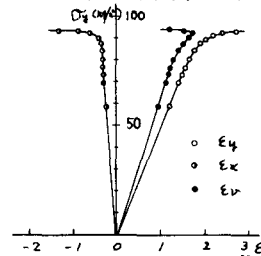


図-6 2相複合材料の $\sigma \sim \epsilon$ 曲線

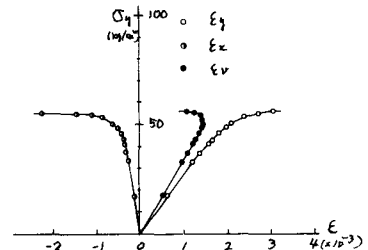


図-7 空隙を含む材料の $\sigma \sim \epsilon$ 曲線

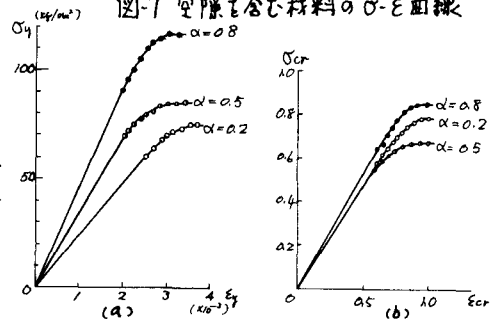


図-8 含有率の変化と $\sigma \sim \epsilon$ 曲線の関係