

I-4 脆性材料のき裂進展に関する一考察

福島高専 正員 ○山ノ内 正司
 東北大学 正員 佐 武 正雄
 東北大学 正員 新 関 茂

1. はじめに

岩石、コンクリート等の脆性材料は、通常、多くの微視欠陥を含んでいる。その圧縮時の強度破壊は、それらの欠陥からのき裂進展、合流等の過程を経てなされ、強度も考察する上で、き裂進展の解析は基本的な問題であると考えられる。筆者等は、これまで、単一材料に内部スリットが入ったモデルについて、FEMによるき裂進展の解析を行なってきたが、⁽¹⁾⁽²⁾ 本報告は、特に耐荷力に着目して、Wilsonの三角形特異要素を用いた解析を行ない、石膏供試体を用いた実験結果と比較し、脆性材料のき裂進展に関して、若干の理論的考察を行なったものである。なお、モデルの分割には、自動分割手法を導入し、体系的な解析を試みた。

2. 特異要素を用いたき裂進展の解析

Wilsonの三角形特異要素(図-1)の変位関数は、次式で与えられる。⁽³⁾

$$U_i = U_{oi} + \left[\frac{\theta_b - \theta}{\theta_b - \theta_a} (U_{ai} - U_{oi}) + \frac{\theta - \theta_a}{\theta_b - \theta_a} (U_{bi} - U_{oi}) \right] \left(\frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

き裂進展条件は、以下の様に仮定した。

(i). 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。

(ii). 分岐き裂は、エネルギー解放率 G が、材料の限界エネルギー解放率 G_c に達した時に、エネルギー解放率が最大となる方向に進展する。⁽⁴⁾ すなわち、

$$K_{I\theta_0} = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} [K_I (1 + \cos \theta_0) - 3 K_{II} \sin \theta_0] \geq K_{Ic} \quad (2)$$

$$K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1) = 0 \quad (3)$$

ここで θ_0 は、き裂進展方向である(図-2)。

(iii). き裂は、解析上、段階的に進展するものとし、その長さは、総要素数との関係を考慮し、可能な限り小さくする。

図-3は、斜め45°の内部スリットが入った解析モデルを示したものである。

なお、特異要素を用いるにあたり、水平き裂(き裂長2C)が入ったモデルの一軸引張のテスト計算を行ない、特異要素長 r_e を、 $r_e = 0.025 C$ とすれば、安定した精度で解が得られることがわかった。

3. 実験方法

実験は、材料として石膏を用い、水-石膏比=60%とした。初めに予備実験として、円柱供試体を用いた割裂試験、三点曲げ法による破壊靱性試験、及びヤング率の測定を行なった。その結果は、表-1に示す通りである。

本実験では、図-3に示す供試体(15×15×5 cm)に一軸圧縮力を加え、荷重と分岐き裂長を測定した(供試体数 27本)。なお、供試体表面のき裂先端の位置は、測微鏡で、できる限り正確に読み取り、き裂進展の判定もより確実に行なうために、AE計測も併用した。また、載荷条件は、約0.25 %/minの荷重制御方式とした。

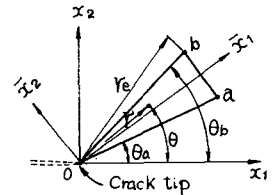


図-1 特異要素

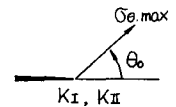


図-2 き裂進展方向

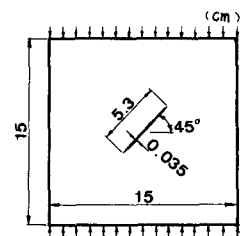


図-3 解析モデル

表-1 材料定数

水-石膏比	60 %
ヤング率 E	$4.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$
ポアソン比 ν	0.1
引張強度 σ_t (割裂試験)	9.7 kg/cm^2
限界応力拡大係数 K_{IIc} (三点曲げ法)	$25.3 \text{ kg/cm}^{3/2}$

4. 解析及び実験結果

図-4は、分岐き裂経路について、解析結果と実験結果をまとめたものである。分岐き裂発生位置は両者共に、内部スリット先端より内側にあり、分岐き裂経路についても、ほぼ一致している。一方、計算によるき裂進展時荷重(図中数字)は、ステップ2では2.59tとなり、実験値に近い値が得られているが(図-6参照)、き裂が進展するにつれて、計算値は増大する結果となり、実験値とのずれが大きくなっている。この原因としては、主に、特異要素長 Y_e の決定法にあったと考えられ、 Y_e はき裂長さだけでなく、載荷端面までの長さの関数でもあり、幾何学的条件の違いが解の精度に影響を及ぼしたものと考えられる。

図-5は、き裂進展に伴うマフロなヤング率の変化を示したものである。き裂が、荷重軸方向に進展した場合、マフロなヤング率はやや低下するが、その割合は、約1%程度である。これは、実験結果とも一致している。

次に、実験より得られた、荷重 P と分岐き裂長さ C の関係を示したものが図-6である。この図から、引張荷重を受けて荷重軸方向と直交する方向に進展するき裂(要なり)、荷重軸方向に進展するき裂は、進展開始後も安定な状態にあり、両者の関係はほぼ直線関係になっている。

最後に、き裂進展とAEは、必ずしも1対1に対応しているとは限らなかった。

5. 考察

ここでは、単一スリットからのき裂が、準静的に進展するものとして考察を行なう。図-5から、石膏板試体の引張りき裂進展に伴うマフロなヤング率の低下は極めて小さい。これは、き裂進展によって解放されるエネルギーは、弾性ひずみエネルギーに比較して、殆んど無視できることを示しており、マフロなヤング率は、殆んど変化しないと仮定できる。これは、Lajtai⁽⁵⁾の実験結果からも妥当であると考えられる。

上述の結果を基礎として、図-7に示すように、表面形成に消費されるエネルギーを無視できる仮定のき裂を考えることができる。従って、線形弾性体である石膏について、荷重 P と、分岐き裂発生位置の開口変位 d との関係は、

$$P \propto d \quad \text{----- (4)}$$

と表現できる。また、開口変位と分岐き裂長さ C との関係は、幾何学的関係から、

$$d \propto C \quad \text{----- (5)}$$

従って、次式が成立し、これは、図-6の荷重-分岐き裂長関係と一致する。

$$P \propto C \quad \text{----- (6)}$$

これらの関係から、開口変位をパラメータとする破壊規準が耐荷力の計算を行なう上で、有効であると考えられる。

6. あとがき

き裂進展の解析は、き裂経路については、実験結果とほぼ一致したと考えられるが、荷重との対応については、更に改善の余地が残されている。また、本文では、荷重とき裂長さとの関係も、理論的に考察した。更に検討の余地は残されているが、以上の考察からは、開口変位をパラメータとする破壊規準が、実用上有効であると考えられる。この計算結果は、当日発表の予定である。

参考文献

- (1) 新聞, 佐武, 小島, 土木学会第32回年次学術講演会講演概要集, 1, pp 606-607, 1977 (2) 山内, 佐武, 新聞, 土木学会第33回年次学術講演会講演概要集, 1, pp 647-648, 1978 (3) W.K. Wilson, Methods of Analysis and Solutions of Crack Problems, pp 485-515, 1973 (4) R.J. Nuismer, Int. J. of Fracture, Vol. 11, No. 2, pp-245-250, 1975 (5) E. Z. Lajtai, Int. J. of Fracture, Vol. 10, No. 4, pp 525-536, 1974

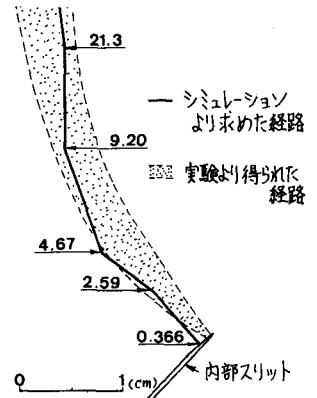


図-4 き裂経路の比較

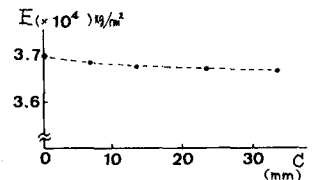


図-5 E-C 曲線

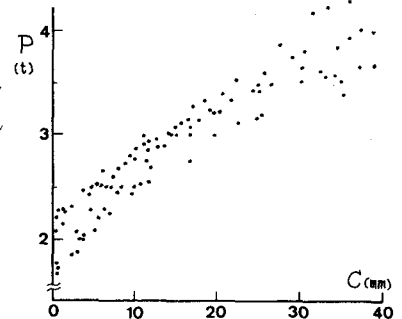


図-6 P-C 関係図

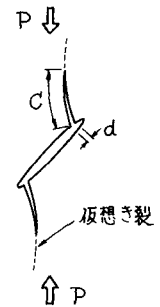


図-7 仮想き裂