

徳島大学工学部

正員 藤井 清司

中電技術コンサルタント(株)

正員 ○藤井 重造

徳島大学大学院

学生員 井和 克彦

まえがき 岩質材料への破壊力学の適用性と、そこでき裂の強度定数として用いられる応力拡大係数の決定については、これまでに報告してきた^{(1),(2)}。今回は圧縮荷重下における傾いた切欠きからのき裂進展の様子を調べるために、内部に単一切欠きを持つ長方形板と円板について圧縮実験を行った。そして、長方形板についてはF.E.M.によるき裂進展のシミュレーションを試みたので併せて報告する。F.E.M.によるき裂を取扱う方法には、要素境界によってき裂を表現する方法と、き裂の進展に依りて要素の剛性を逐次修正する方法の二種類のものが考えられる。ここでは、前者の方法として要素の自動再分割を取り入れ、き裂の進展に関する条件として応力拡大係数を使ったErdoganとSihの最大周方向応力説を用いたものを試みた。また後者の方法としては、要素に直交異方性を導入し、Griffithおよび修正Griffithの判定規準によりき裂進展シミュレーションを試みた。

圧縮荷重下におけるき裂進展実験 圧縮荷重を受ける機會の多い岩質材料では、その内部欠陥において部分的には過度のせん断力や引張力を生じるため、破壊力学的にみれば変形モードとしてIとIIの混合モード状態になり、一見きわめて複雑な破壊過程を呈する。そこで、このような場合にも引張破壊様式に対する破壊力学的基準が適用できるかどうか、また適用できた場合にはその破壊基準が如何なるものかという問題は、岩質材料に対して破壊力学を導入する上で避けることのできない問題であると思われる。そのため、実際に荷重軸に対して傾いた単一切欠きを中央に設けた長方形板および円板に圧縮荷重を作用させ、それによって混合モード下にある岩質材料がどのような様相を示すのかを実験的に確めた。図1が各々の供試体の形状と実験方法を示したものである。長方形板の寸法は高さ×幅×板厚=12cm×8cm×4cmで切欠き長さを $2a=2$ cmとし、切欠きの荷重軸に対する傾き β は $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の三種類とした。また、円板は直径 $2R=10$ cm板厚 $t=5$ cmでこれも $2a=2$ cmとし、 β は $28^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の三種類とした⁽²⁾。切欠きの先端形状は破壊靱性試験の試験片に設けた切欠きと同一の形状のものである。供試体材料にもそれと同じ

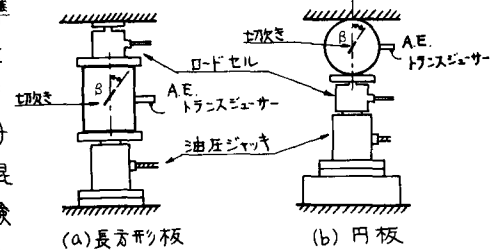


図1 圧縮荷重によるき裂進展実験

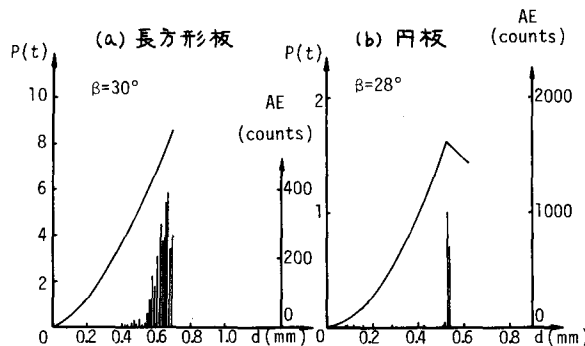


図2 荷重→変位曲線およびA.E.発生状況

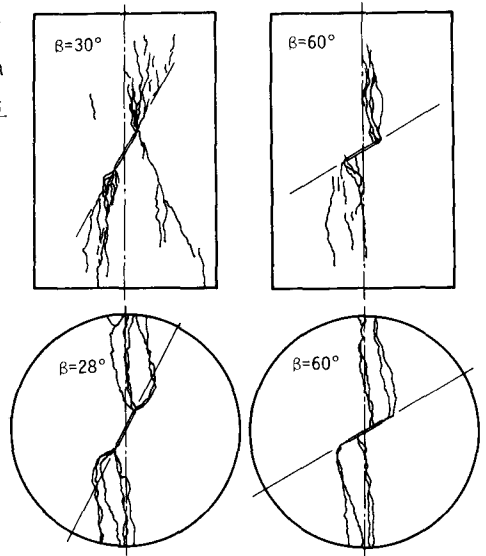


図3 き裂進展状況

水：普通ポルトランドセメント：砂 = 1 : 2 : 6 のセメントモルタルを使用した。荷重は油圧ジャッキを用いて変位速度一定で (0.1 mm / 3 min) 作用させたが、図2は各々の実験から得られた荷重～変位曲線の一例である。これには、今回の実験において平行して観測したアコースティック・エミッションの発生状況も示しておいた。長方形板については、き裂発生後供試体の破壊する前に載荷を中止したものであるが、円板ではき裂発生と同時に瞬間的に供試体が破壊した。図3はそのき裂進展状況を、長方形板は $\beta = 30^\circ, 60^\circ$ 、円板は $\beta = 28^\circ, 60^\circ$ の数例についてまとめて示したものである。これより特徴的なのは、 β が小さいときには切欠き先端に集中していたき裂の発生が、 β が大きくなると切欠き先端だけでなく切欠き面からの発生もみられること、また円板については、き裂がある角度をなして二方向に同時に発生していることである。

FEMによるき裂進展シミュレーション 岩質材料のき裂進展を破壊力学的方法により取扱い、シミュレーションを行うために次のような条件を設けた。まずき裂が進展を開始するための条件としては、そのき裂先端部での K_I ないしは K_{II} (モード I と II の応力拡大係数) の値が各々破壊靱性値 K_{IC} あるいは K_{IIC} を越えようとするときに進展を開始するものとした。そして、その方向を決定する条件として Erdogan と Sih の最大周方向応力説を用いた。すなわち、き裂が進展を開始したときのき裂先端の応力状態が K_{I0} 、 K_{II0} で表わされたとなると、き裂は

$$K_{I0} \sin \theta + K_{II0} (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

を満足する θ なる方向に進展する。しかし、その進展量については現時点においては決め手となるものがないので、本解析では分割した要素一つ分の長さだけ進展するものと仮定した。また、進展したき裂が停止する条件も必要となるが、要素一つ分だけ進展したき裂の先端における K 値が次に $K = K_c$ を満足するまでき裂は停留しているということ代用した。したがって、 $K = K_c$ になるまでは荷重が増分されることになる。ここで、 K 値の決定には村上の簡便決定法を用いたが、これについては前回報告したのでここでは省略する。さて、き裂を要素境界で表わしその進展を追跡しようとする、進展ごとに要素の再分割をしなくてはならない。そこで、再分割の手間を省くために本解析では自動再分割を行った。これは、(1) 式で求めた方向にき裂を進めたときに最初に交わる要素境界線との交点に、それに最も近い節点を移動して新しいき裂先端とし、もとき裂先端があった節点には同一座標の節点を新たに設けてき裂面を形成させるようにしたものである。以上がシミュレーションの概略であるが、破壊力学的方法では常にき裂先端の応力状態に注目するため、実験でみられたような切欠き面上からのき裂の進展については取扱うことができない。そこで、もう一つの方法として Griffith のおよび修正 Griffith の規準によるシミュレーションも行った。この Griffith の規準は要約すると次のように表わされる。

$$\sigma_1 - \sigma_2 > 0, \left\{ \begin{array}{l} \text{(i)} \quad 3\sigma_1 + \sigma_2 \geq 0 \text{ のとき, } \sigma_t - \sigma_1 \leq 0, \alpha = 0 \\ \text{(ii)} \quad 3\sigma_1 + \sigma_2 < 0 \text{ のとき, } \sigma_t - \sigma_n \leq 0, \cos 2\alpha = -1/2 (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 + \sigma_2) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ここで, } \sigma_n = -1/8 (\sigma_1 - \sigma_2)^2 / (\sigma_1 + \sigma_2) > 0$$

また、修正 Griffith は

$$(\sigma_1 - \sigma_2) (1 + \mu)^{1/2} + \mu (\sigma_1 + \sigma_2) = 4\sigma_t (\sigma_c / \sigma_t + 1)^{1/2} + 2\mu \sigma_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わされ、ここで μ は摩擦係数であり、これによって圧縮力によるき裂の開閉についても考慮することができ、この方法では、各要素を各々の規準によりチェックし、もしその規準が満足されればその要素に対して破壊角 α と Stress Ratio (Sr) を計算する。そして、その要素内全体に α 方向のき裂を生じさせ、最小 Sr は系の中の全ての応力を減ずるための縮尺係数として用いる。ここで、き裂要素は直交異方向性を導入することでモデル化され、単一き裂の場合、き裂平面に垂直な方向の変形にはほとんど抵抗しないような特性を、また、要素内に二つの平行でない開口き裂がある場合には、要素は変形に対してほとんど抵抗しないような特性を持つ。以上述べた二つの方法によるシミュレーションの結果については、当日詳しく報告することにしてここでは省略する。

参考文献 (1) 土木学会中四支部年次講演第29回「岩石材料への破壊力学」……1977, (2) 土木学会年次講演第32回「岩石材料への破壊力学による岩石材料の応力拡大係数決定について」1977, (3) Erdogan, Sih, "On the Crack Extension"……Trans. ASME Vol. 95, 1963