

徳島大学工学部  
徳島大学大学院正員 藤井清司  
学生員 口埜和克彦

手えがき 破壊力学は通常は引張材に対して適用されるが、岩質材料もき裂・欠陥・不連続部などの特異点を含むためにぜい性を示すので、その適用が可能であると考えられる。したがって、本報告では岩質材料の圧縮破壊過程における破壊力学の適用性を検討するため、前回の報告<sup>(1)</sup>に引き続き、内部に単一切欠きを有する長方形板について圧縮実験を行い、同形状モデルについてF.E.M.によるき裂進展シミュレーションを試みた。F.E.M.によりき裂と取扱う方法としては要素境界によつてき裂を表現する方法を用い、き裂の進展に関する条件としては応力拡大係数( $K$ 値)を使つた Erdogan と Sih の最大周方向応力説を用いた。また $K$ 値の決定には村上の簡便決定法を用いたが、そのプログラム化に改良を加え、 $K$ 値算定の高精度化を試みた。

き裂進展実験 岩質材料の多くは、内部に存在する種々の欠陥のため組合せ応力を受けるのが一般である。そのため破壊力学的にみれば変形様式もモードIとIIの混合モード状態となる。したがって、岩質材料のぜい性破壊に対する安全性を評価するためには、このような混合モード状態における破壊基準を明らかにする必要がある。そこで、上述の変形状態を生じさせるため、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に圧縮荷重を作用させ、き裂進展実験を行った。長方形板の寸法は高さ×幅×板厚 =  $18\text{cm} \times 12\text{cm} \times 4\text{cm}$  で切欠き長さ  $2a = 3\text{cm}$  とし、切欠きの荷重軸に対する傾き  $\beta$  は  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  の3種類とした。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形状のものである。使用材料、実験方法については前回報告した<sup>(1)</sup>でここでは省略する。図1は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(AE)の発生状況も示しておいた。これによると、各角度とも6セ前後からAEの発生がみられ、き裂の発生および進展を示しているものと思われる。き裂発生荷重を測定する方法として上述のAE観測の他に、切欠き先端部に一方向抵抗線ひずみゲージ(ゲージ長10mm)を貼りつけ、そのひずみ量から測定するという方法も試みた。この方法で荷重～ひずみ曲線を描かせると、ひずみ量300 $\mu$ 付近でひずみが急増するが、この時の荷重値をゲージ貼りつけ位置でのき裂通過荷重値と考える。図2はき裂進展状況と  $\beta = 30^\circ, 45^\circ$  の数例について一つの図に重ね合せて表わしたものである。これらのき裂線群の平均として実験による各 $\beta$ における進展き裂の形状が得られる。なお、図中の切欠き上部の3本の横線はひずみゲージ貼りつけ位置を示すものである。これを見ると、き裂の発生は  $\beta = 30^\circ$  では切欠き先端に集中しているが、 $\beta = 45^\circ$  になると切欠き先端だけでなく切欠き面からも見うけられる。そして、この傾向は  $\beta = 60^\circ$  になるとさらに顕著となる。

き裂進展シミュレーション 破壊力学による岩質材料のき裂進展シミュレーションについては前

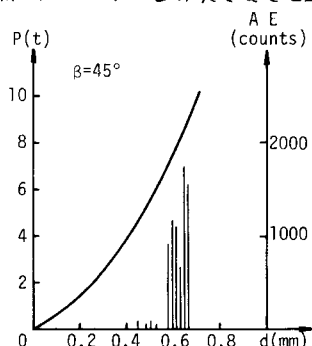


図1 荷重～変位曲線およびAE発生状況

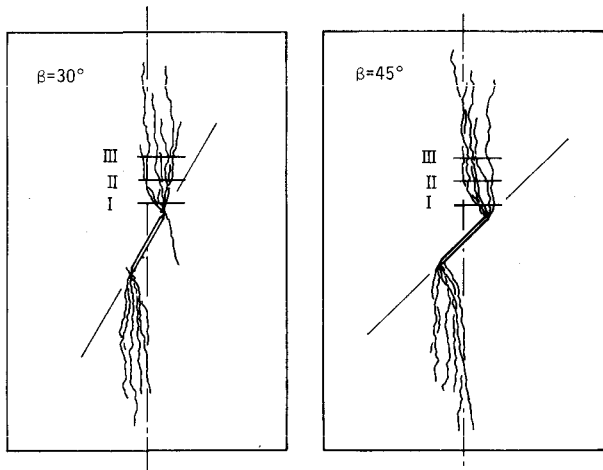


図2 実験より得られるき裂進展状況

回と同様の手法を用い、次のような条件を用いた。(1)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 $K_I$ ないし $K_{II}$ (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とする。(2)進展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る。(3)進展量としては F.E.M.解析のために分割した要素一つ分の長さだけ進展すると仮定する。(4)進展したき裂が停止する条件としては、一要素分進展したき裂先端における $K$ 値が次に $K = K_c$ を満足するまでき裂は停止するということで代用する。なお、以上の条件に用いる $K$ 値は村上の簡便決定法を用いて式(1)のように計算される。

$$K_I = (\sigma_{tip} - \sigma_g) \sqrt{\pi a} / \sigma_c \quad K_{II} = (\tau_{tip} - \tau_g) \sqrt{\pi a} / \tau_c \quad (1)$$

式中の $\sigma_{tip} - \sigma_g$ ,  $\tau_{tip} - \tau_g$ は切欠きが存在するために生ずる応力変化、 $a$ は切欠き長さの半分、 $\sigma_c$ ,  $\tau_c$ はそれぞれき裂長さとしき裂先端要素の大きさの比 $\alpha$ の関数として与えられる量である。前回はこの $\sigma_c$ ,  $\tau_c$ を定数として与えていたため、き裂進展荷重値が実験値と大きく異なっていた。したがって今回はこの点を改良するため、各々のき裂進展に伴い、その進展量を順次加え合わせ、各段階における $\alpha$ を新たに計算し、式(2)によって得られる $\sigma_c$ ,  $\tau_c$ を式(1)で用いることにした。

$$\sigma_c = 0.122 \alpha^{-1.860} \quad \tau_c = 0.048 \alpha^{-1.935} \quad (2)$$

表1に必ずみゲージより得られた実験値と、その位置に相当する解析値を示す。また、初期き裂発生荷重は $\beta = 30^\circ$ では4.3七、 $\beta = 45^\circ$ では5.4七となった。これらの結果より、本解析はAEおよび必ずみゲージによる実験値に比較的良好に適合していると思われる。ただし、実験では $\beta$ が大きくなるにしたがって初期き裂発生荷重は若干小さくなる傾向にあるが、解析ではその逆になっている。これは、実験における切欠き面からのき裂発生を、破壊力学で取扱うことができなかったためであると思われる。全体の進展状況を図3に示す。これによると、 $\beta = 30^\circ$ ,  $45^\circ$ 共になめらかではないが、中心軸に沿って、それとよりよくように進展している。そして、その破壊様式としては $K_I = K_{IC}$ によるものが多く見られる。これらも実験で得られた傾向をよく示していると思われる。

あとがき 今回の実験で、切欠きから発生するき裂には、その先端から発生するもの以外に、切欠き面から発生するものがあり、切欠きの傾きが大きくなると後者のき裂発生が多くなることがわかる。また、これらのき裂のうち、切欠き先端から発生する単一き裂に関しては、 $K$ 値によるシミュレーションでその様子をとらえることが可能であり、このことから、岩質材料への破壊力学の適用は有効であることがわかる。さらに、実験時におけるAEの測定も、き裂進展の挙動を把握するのに有効な手段であると思われる。しかしながら、今回の解析では一段階ごとのき裂の進展量を要素の大きさと同じオーダーのものと仮定しているため、一回の進展方向の変化が要素分割の仕方によっては全体の進展経路に大きな影響を与えてしまうため、ある程度き裂の進路を予測した細かい要素分割が必要になると考えられる。

参考文献 (1)藤井他「岩質材料への破壊力学の応用について」土木学会第33回講演概要Ⅲ-233 1978.9 (2)藤井他「破壊力学によるせいの性材料の逐次破壊に関する研究」徳島大学工学部研究報告 No.24 1979

| $\beta$                  | 30° |     |      | 45° |     |     |
|--------------------------|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| Gauge No.                | I   | II  | III  | I   | II  | III |
| Experimental Results (t) | 6.2 | 8.6 | 9.4  | 5.4 | 6.5 | 6.8 |
| F.E.M. Analysis (t)      | 5.6 | 5.6 | 10.1 | 5.4 | 6.9 | 6.9 |

表1 き裂進展荷重値

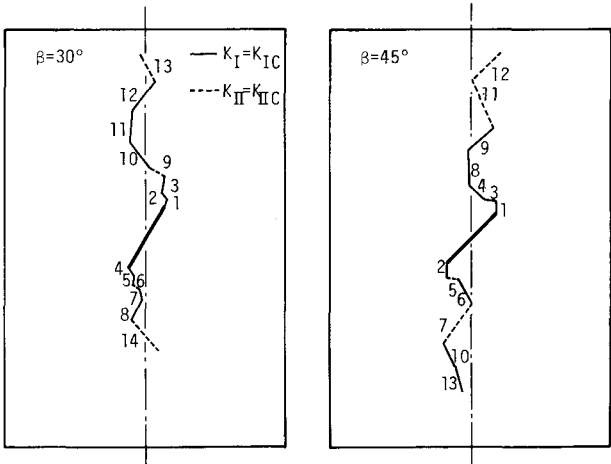


図3 解析より得られるき裂進展状況