

徳山工業高等専門学校 正会員 橋本 堅一
徳山工業高等専門学校専攻科
環境建設工学専攻 学生会員 ○阿部 亮太
徳山工業高等専門学校 正会員 島袋 淳

1. はじめに

今日では、活断層による地震はき裂の進展・伝播が深く関係しているとされ、破壊力学が断層型地震の発生メカニズムの研究にも取り入れられるようになった。また、岩石やコンクリートのように引張強度が非常に小さく、脆性破壊を起こす材料におけるき裂の進展挙動を、破壊力学的に考察することは重要とされている。

岩石やコンクリートなどの脆性材料は、圧縮荷重によるき裂の進展が問題視されており、その圧縮破壊過程のメカニズムは、引張破壊過程に比べ複雑である。

圧縮荷重下では多くの場合、き裂は閉じて接触し、摩擦の影響を受けながら滑り、モードⅠ型（面内せん断型）とモードⅡ型（面外せん断型）の変形様式に支配され進展する。純粋なモードⅠ型き裂変形様式では、ウイング型のき裂が発生し、ほぼ最大主応力方向に進展することが知られている¹⁾。三次元の複雑な圧縮荷重下では、モードⅠ型の変形様式の特性も考える必要がある。そこで本研究では、アクリル樹脂供試体を用いてモードⅠ型き裂変形様式の実験を試みた。

2. 応力拡大係数

応力拡大係数 K は、き裂先端の力学的環境条件として用いられ、き裂先端付近に分布する応力の強さの程度を表す係数である。一般に載荷応力 σ に比例し、 $[\text{応力}] \times [\text{長さ}]^{1/2}$ の次元あるいは $[\text{力}] \times [\text{長さ}]^{-3/2}$ の次元を持っている。また、物体やき裂面の形状寸法や境界条件によって決まる。

基本的な物体やき裂の形状寸法や境界条件の場合における応力拡大係数は、いくつかのハンドブック^{2),3)}に記載されている。本研究でのモードⅠ型の実験に対応するき裂変形状態は、図-2に示すようなモデルを選択した。図-1は、厚さ W の無限板に初期き裂深さ a が存

在し、き裂面にせん断応力 τ_c が生じている状態を示している。これに対応する応力拡大係数 K が次式である。

$$K = F(\alpha) \tau_c \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{a}{W} \quad (2)$$

$$F(\alpha) = \sqrt{\frac{2}{\pi \alpha} \tan \frac{\pi \alpha}{2}} \quad (3)$$

式(1)はせん断応力のみにより評価された応力拡大係数の式である。また、式(3)は境界条件に関係した係数であり、 W が大きくなるにつれて、 $F(\alpha)$ は1に近づく。

応力拡大係数 K がある限界値 K_c に達すると、破壊き裂が発生し、脆性破壊が起こることもある。この K_c を破壊靱性値という。

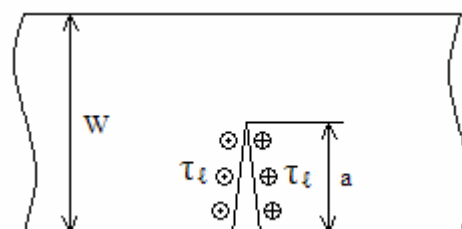


図-1 モードⅠ型のき裂に作用するせん断応力

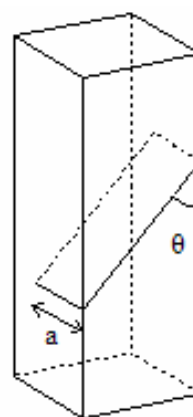


図-2 モードⅠ型実験供試体

3. 実験概要

(1) 供試体

本研究では実験供試体に、脆性度が非常に高く、線形弾性体に近い挙動を示すアクリル樹脂を使用した。ここでいうアクリル樹脂とは、三菱レイヨン社アクリルライト（商品名）であり、メタクリレート樹脂、メタクリル樹脂、メタクリル酸メチルエステル合成樹脂などと呼ばれている。無色透明であるため、き裂の発生・進展状況を視覚的に捉えることができる。

供試体寸法は $30 \times 30 \times 100$ mmの直方体とし、中央部に載荷軸と角度を付けた人工の初期き裂を設ける。初期き裂の設置については外注し、そのき裂幅は1mm程度であった。図-2のように、直方体側面に垂直なき裂面を持つき裂を、隣り合う側面と角度を付け斜めに設けた供試体に、一軸圧縮荷重を行うことで、純粋なモードⅠ型の実験が可能となる。

供試体は、初期き裂の長さ a と角度 θ を変えた6種類のをそれぞれ3つずつ用意した。き裂長さ a を25mm, 20mm, 15mm, 角度 θ を 30° , 45° のいずれかとした。例えば、初期き裂角度（degree） 30° 、長さ（crack length）25mm、実験1を30D25CL-1と名付けた。

(2) 実験方法

実験には油圧サーボ式の材料試験機（島津サーボバルサEHF-EUB30）を用い、荷重と変位を付属のロードセルおよび変位計から載荷試験制御用の制御装置内臓のアンプを通して、万能測定器（東京測器研究所；THS-1100）からGP-IBインターフェイスを介してコンピュータに取り込んでいる。載荷速度 0.5×10^{-2} mm/secの変位制御で荷重を加え、供試体が最大荷重を示したことを確認した時点で実験終了とした。

実験1では、厚さ0.25mmのアクリル板を3枚初期き裂に挿入した。実験2では初期き裂をカッターナイフで鋭くし、実験1同様にアクリル板を挿入した。

4. 実験結果

(1) き裂の進展

供試体に一軸圧縮荷重を行うと、予め設置しておいた初期き裂から二次き裂が発生する。各々の供試体のき裂の進展状況を考察した。図-3は実験終了時のき裂



(a)30D25CL-1



(b)30D15CL-1

図-3 実験終了時のき裂の様子

の様子をカメラで撮ったものである。

純粋なモードⅠでは、全ての供試体において初期き裂先端から花びらに似たき裂が発生した。ここではこのようなき裂を花弁き裂（Petal crack）と呼ぶ。図-3, (a)のように初期き裂が長い供試体からは、小さな花弁き裂が複数観察された。これらの花弁き裂は、自由面まで達すると音を発し、き裂は初期き裂に沿ってある一定の間隔で進展・伝播を繰り返す。図-3, (b)のように初期き裂が短い供試体からは大きな花弁き裂が比較的少ない数で観察された。

実験2ではカッターナイフで初期き裂を鋭くしたが、実験1に比べて花弁き裂の数が増えている供試体があったことから、き裂が進展しやすくなったと言える。

(2) 破壊応力及び応力拡大係数

図-4は実験によって得られた変位と荷重から、最大荷重を示した時点の載荷面に作用する破壊応力 σ_c と変

位の関係及びせん断応力のみにより評価した応力拡大係数 K と変位の関係をグラフに表したものである。

図-4のグラフを比較してわかるように、初期き裂が長い供試体の方が短いものに比べて、最大荷重が小さいことから、初期き裂が長いほど破壊に対する影響が大きいことがわかる。アクリル樹脂の圧縮強度は123.6MPaであるが、載荷面に作用する破壊応力 σ_c は10～50MPa程度であったことから、破壊は初期き裂に大きく影響されていることが確認できる。

ここで、これまでに行われてきた破壊靱性値の研究の結果、アクリル樹脂の材料特性としてモードⅠの破壊靱性値 K_{IC} 及びモードⅡの破壊靱性値 K_{IIC} は1～2MPa $\sqrt{m}$ 程度であることから^{4),5)}、モードⅠの破壊靱性値 K_{IC} を1.5MPa $\sqrt{m}$ と仮定する。限界応力拡大係数 K は破壊靱性値 K_{IC} に比べて値が大きいことから、き裂面には摩擦力が働いていることがわかる。これは式(1)が摩擦を考慮していない式であるからで、き裂面に働く摩擦力を考慮し K を算出した場合、1.5MPa $\sqrt{m}$ に近い値が得られることが予測される。

また、初期き裂角度 θ が小さく、き裂面が急な供試体の方が壊れやすくなり、最大荷重が小さくなると予測したがあまり違いは見られなかった。このことから、き裂面に働く摩擦力が破壊の抵抗に影響を与えていることがわかる。

5. おわりに

本研究では、モードⅠ型の変形様式に対応するような初期き裂を設置したアクリル樹脂供試体に圧縮荷重を行い、実験的に初期き裂から生じる二次き裂の進展特性及び破壊特性について検討した。その結果、以下のような結論に至った。

モードⅠ型変形様式の実験では、実験で使用した全ての実験供試体から花弁き裂の発生が確認された。また、成長した花弁き裂により最終的な破壊に至る。破壊は初期き裂に大きく影響されるが、その長さにも影響され、初期き裂が長いものほど壊れやすい。初期き裂を鋭くして実験を行った場合、鋭くしなかった場合に比べて発生する花弁き裂の数が増えたことから、鋭い欠陥であるほどき裂が進展・伝播しやすいと言え、破壊は欠陥の鋭さにも影響される。

アクリル樹脂におけるモードⅠ型変形様式では、ほ

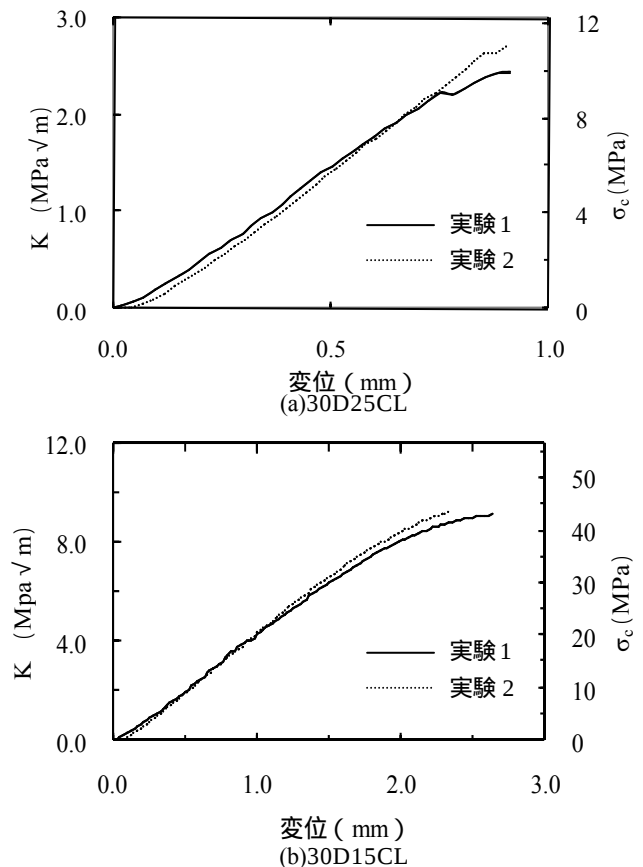


図-4 破壊応力及び応力拡大係数と変位の関係

ば統一的なき裂進展を見出すことができたが、実際に岩石やコンクリートといった脆性材料において統一的なき裂進展及び破壊が見られるとは考えにくく、今後モルタルや岩石による実験を行うなど、さらに多くの資料を得ることが必要である。

参考文献

- 1) 橋本堅一，矢富盟祥，島袋 淳：圧縮荷重下の面内および面外せん断型変形を受けるき裂による破壊現象の実験的考察，材料，Vol.56，No.10，pp.970-976，2007.
- 2) Y.MURAKAMI：STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK，PERGAMON PRESS，1987.
- 3) D.P.Rooke，D.J.Cartwright：Compendium of STRESS INTENSITY FACTORS，London Her Majesty's Stationery Office，1976.
- 4) Ken-ichi HASIMOTO：Consideration on Evaluation of Fracture Toughness and Testing Methods，徳山工業高等専門学校研究紀要，第27号，pp.17-22，2003.
- 5) Ken-ichi HASIMOTO：On Consideration for Fracture Toughness Evaluation of ModeⅠ，徳山工業高等専門学校研究紀要，第31号，pp.31-35，2007.