

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

地震大国とよばれる日本には、活断層が数多く存在しており、それらが運動することにより地震が発生する。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。

圧縮荷重下のき裂は、モードⅡ（面内せん断型）とモードⅢ（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Ⅱのき裂変形様式では、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<sup>1)</sup>。三次元の複雑な圧縮荷重下では、モードⅢの変形様式の特長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およびモルタル供試体を用いてモードⅢのき裂変形様式の実験を試み、その破壊メカニズムについて検討した。

## 2. 破壊の変形様式

破壊の変形様式には、図-1に示すように独立な3つの変形様式がある。図中の矢印は、き裂面の移動する方向を示しており、順に開口型、面内せん断型、面外せん断型き裂変形様式といい、便宜上それぞれモードⅠ、モードⅡ、モードⅢのき裂変形様式と呼んでいる。

モードⅠは、き裂面に対して垂直に引張応力が作用することでき裂が開く変形様式である。一方モードⅡあるいはモードⅢは、き裂面に対して平行にせん断応力が作用することでき裂面にずれが生じる変形様式である。モードⅡはき裂先端軸に対して垂直にずれ、き裂面内部でせん断を起こし、モードⅢはき裂先端軸に対して平行にずれ、き裂面外部に向かってせん断を起

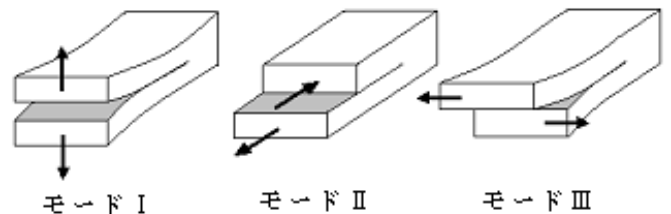


図-1 破壊の3つの変形様式

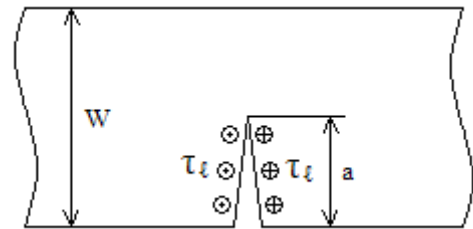


図-2 き裂に作用するせん断応力

こす<sup>2)</sup>。

本研究ではこの3つの変形様式のうち、モードⅢの変形様式に対応する実験供試体を作成し実験を行った。

## 3. 応力拡大係数K

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 $\sigma$ に比例し、[応力] $\times$ [長さ]<sup>1/2</sup>の次元あるいは[力] $\times$ [長さ]<sup>-3/2</sup>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<sup>3),4)</sup>に記載されている。本研究でのモードⅢ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-2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 $\tau_l$ 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。

$$K_{III} = F_{III}(\alpha) \tau_{\ell} \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

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

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

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、 $F_{III}(\alpha)$ 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。

## 4. 実験概要

### (1)供試体

本研究では実験供試体に、比較的均質な脆性材料であるアクリル樹脂とモルタルを使用した。アクリル樹脂は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。モルタルは、水セメント比を0.60とし、セメントと砂の質量比を1:2とした。

供試体は直方体とし、中央部に载荷軸と角度を付けた人工の初期き裂を設ける。図-3のように、直方体側面に垂直なき裂面を持ちき裂を、隣り合う側面と角度を付け斜めに設けた供試体に、一軸圧縮载荷を行うことで、純粋なモードⅢの実験が可能となる。表-1に、供試体寸法および初期き裂寸法を示す。

供試体は、例えば初期き裂角度 (degree) 30°, 長さ (crack length) 25mmの場合、30D25CLというように名付けた。

### (2)実験方法

実験には油圧サーボ式の材料試験機（島津サーボパルサ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载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。载荷速度 $0.5 \times 10^{-2} \text{mm/sec}$ 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。

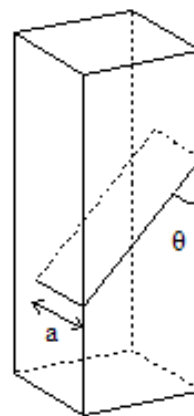


図-3 モードⅢ型実験供試体

表-1 供試体寸法

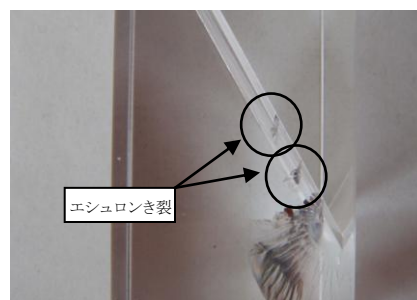
|             | アクリル樹脂     | モルタル      |
|-------------|------------|-----------|
| 供試体寸法(mm)   | 30×30×100  | 60×60×200 |
| 初期き裂長さa(mm) | 25, 20, 15 | 50, 40    |
| 初期き裂角度θ     | 45°, 30°   | 45°, 30°  |



(a)30D25CL

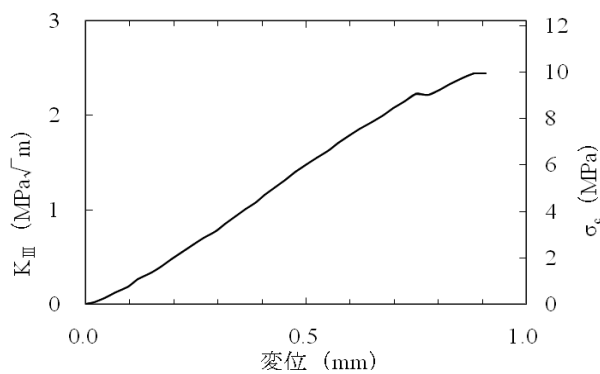


(b)30D15CL

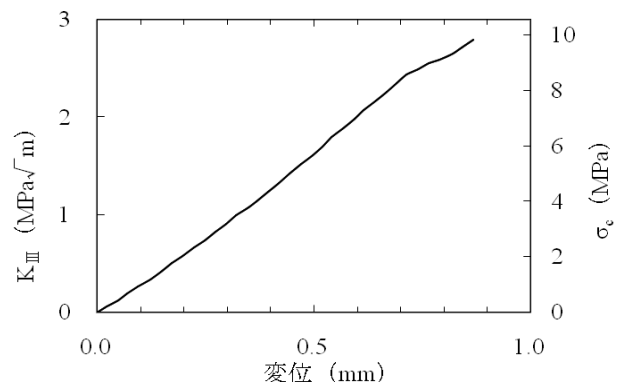


(c)30D20CL

図-4 き裂の発生状況（アクリル樹脂）



(a)30D25CL



(b)45D25CL

図-5 破壊応力及び応力拡大係数と変位の関係（アクリル樹脂）

## 5. 実験結果

### (1)アクリル樹脂供試体

全てのアクリル樹脂供試体において、初期き裂先端から花弁き裂（Petal crack）が発生した。初期き裂が長い供試体では、連続的な複数の花弁き裂が観察された（図-4(a)）。初期き裂が短い供試体では、大きく広がる花弁き裂が観察された（図-4(b)）。図-4(c)は、30D20CLの供試体におけるき裂の発生の様子である。この写真に見られる初期き裂軸と交差する小さなき裂は、エシュロンき裂であると考えられる。そのエシュロンき裂の発生直後に花弁き裂へと移行していくものと推察される。

図-5は、最大荷重を示した時点の載荷面に作用する破壊応力 $\sigma_c$ 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 $K_{III}$ と変位の関係を示している。ここで用いたアクリル樹脂の圧縮強度は123.6MPaであるが、初期き裂を有するアクリル樹脂の載荷面に作用する破壊応力 $\sigma_c$ 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√m程度であることから<sup>4)5)</sup>、モードⅢの破壊靱性値 $K_{IIIC}$ を1.5MPa√m程度であると仮定する。限界応力拡大係数 $K_{III}$ は破壊靱性値 $K_{IIIC}$ に比べて値が大きいことから、き裂面には大きな摩擦力が働いていることがわかる。また、初期き裂角度 $\theta$ の違いによる破壊応力 $\sigma_c$ への影響は見られなかったことから、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。



(a)スプリッティング



(b)破壊面

図-6 き裂の発生状況（モルタル；30D50CL）

## (2)モルタル供試体

モルタルの場合、多くの供試体において初期き裂面に沿ったスプリッティング（縦割れ破壊）が見られた（図-6(a)）。破壊面はアクリル樹脂とは全く異なった平滑な面であった（図-6(b)）。また、初期き裂先端付近では複雑なき裂進展が見られた。

図-7は、図-5と同様に、破壊応力 $\sigma_c$ と変位の関係及び応力拡大係数 $K_{III}$ と変位の関係を示している。本研究で使用したモルタルの初期き裂を有していない供試体の圧縮強度は45.3MPaであったので、破壊は初期き裂に影響されていることが確認できる。また、モルタルの破壊靱性値 $K_{IIIc}$ は、0.5MPa $\sqrt{m}$ 程度であると考えられるので、き裂面に大きな摩擦力が働いていることがわかる。アクリル樹脂と同様に、初期き裂角度 $\theta$ の違いによる破壊応力 $\sigma_c$ への影響は見られなかったため、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。

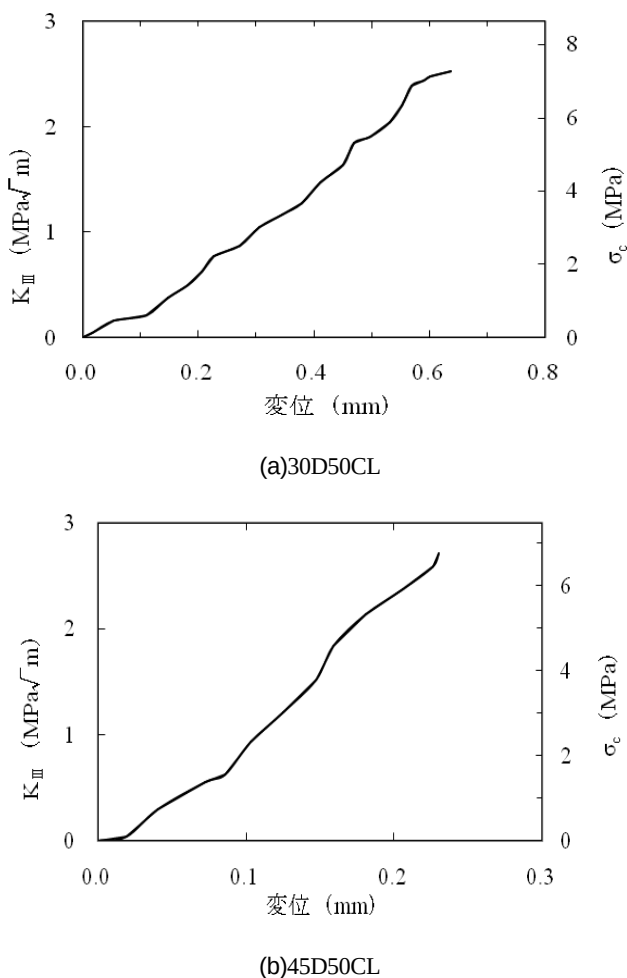


図-7 破壊応力及び応力拡大係数と変位の関係（モルタル）

## 6. おわりに

本研究では、モードⅢ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及びモルタル供試体に圧縮载荷を行い、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、以下のような所見が得られた。

アクリル樹脂では、全ての供試体から花弁き裂の発生が確認された。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。また、き裂面に働く摩擦力が破壊の抵抗に影響を与えている。

モルタルでは、アクリル樹脂とは異なる破壊が見られることから、材料の種類によって破壊が変化することがわかった。アクリル樹脂と同様に、破壊は初期き裂に影響される。また、き裂面には摩擦力が働き、破壊の抵抗に影響を与える。

アクリル樹脂におけるモードⅢ変形様式では、ほぼ統一的なき裂進展を見出すことができた。モルタルにおいても統一的なき裂進展及び破壊挙動を見出すために、さらに多くの実験を行う必要がある。材料によって破壊は変化するため、花崗岩等の岩石による実験も重要である。

## 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，Reprinted from JOURNAL OF THE SOCIETY OF MATERIALS SCIENCE JAPAN, Vol.56, No.10, pp.970-976, 2007.
- 2)大中康譽，松浦充宏：地震発生の物理学，東京大学出版会，pp.58-66, 2002.
- 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 Mode II, 徳山工業高等専門学校研究紀要，第 31 号，pp.31-35, 2007.