

# 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<sup>†</sup>

橋 本 堅 一<sup>\*</sup> 矢 富 盟 祥<sup>\*\*</sup> 島 袋 淳<sup>\*</sup>

## Experimental Study on Fracture Behavior due to a Crack under Mode II and Mode III Deformation by Compressive Loading

by

Ken-ichi HASHIMOTO<sup>\*</sup>, Chikayoshi YATOMI<sup>\*\*</sup> and Atsushi SHIMABUKURO<sup>\*</sup>

Compressive loading tests using acrylic acid resin and mortar specimens are conducted to research the fracture of materials with a macroscopic discontinuity under the compression loading in this study. The new types of specimen shape that can produce mode II and mode III deformation are used. The fracture takes place after crack is closed, that is, under the condition that the each crack surfaces are contacted. The fracture under mode II deformation occurs with a well-known wing crack for all specimens. In the experiments under mode III deformation using mortar specimens, the fracture surfaces include partly the fracture surface along the initial crack surface. But almost fracture surfaces are made by the fracture pieces related to the splitting. In the mode III experiments with an acrylic acid resin specimens, the fracture near the crack tip has the coarse surface and the fracture along the initial crack surface is found out.

**Key words :** Compressive loading, Crack initiation, Crack growth, Mode II, Mode III, Fracture surface, Fracture behavior

### 1 緒 言

圧縮荷重下のコンクリートあるいは岩石などの脆性材料の破壊は載荷様式、材料を支配する構造および内部欠陥等に依存した様々な形で起こる。圧縮荷重下の岩石やコンクリートでは、縦割れ破壊（スプリッティング）とせん断破壊の二つの基本的な形の破壊が観察される。十分に高い圧力や温度のもとでは、多くの岩石の変形挙動は脆性的挙動から塑性的挙動に変化することも知られている。

Griffith は最初に、固体内の多くの潜在き裂、それも比較的小さなき裂が圧縮荷重下の脆性破壊を決定する重要な役割を果たしていることを示した。<sup>1), 2)</sup> それらのき裂は互いに干渉がないとみなされるほどの距離をおいて離れて位置していると仮定して、非常に多くの、しかも任意の方向性を持つものと考えた。さらに、非均一圧縮荷重下の破壊に対する一般的な条件は、一方のき裂端での応力がある一定の引張応力値に到達したときに得られると仮定した。すなわち圧縮荷重下のき裂進展の Griffith の解析はき裂進展を発生させる引張応力の大きさに関係していることを示している。

き裂に斜向した一軸圧縮応力場のき裂を二次元的に考える場合、発生したき裂が材料の全厚さを通して進展すると考えるので、初期き裂の両先端からある角度を持って折れ曲がった二本のき裂、いわゆるウィングき裂が二次

き裂として発生する。<sup>3)~7)</sup> そして圧縮応力の方向に向かって、安定的な傾向で進展する。その現象を、三次元き裂の立場から考察する時、ウィングき裂の開口はそれ自体、圧縮荷重下の岩石のダイレイタンスーとして捉えられる付加的な内部体積を生み出す要因であると言われている。また、二次的き裂の発生は、ある長さまで動的に伸びる傾向がある。その後、き裂の進展は、載荷荷重に対して連続的な増加を必要としながら準静的に進む。しかしながら、このような圧縮荷重下のき裂とは対照的に、引張応力下のき裂進展は不安定に進展する場合が多い。すなわち均質材料内の引張破壊と圧縮荷重下における脆性破壊を区別するものはき裂の安定成長の存在と考えられる。

多くのき裂の進展は、破壊を起こすのに十分な発達に至るまで徐々に干渉と合体の両方を活性化させていく。このとき、進展するき裂の数は実験室レベルで観察されるようにダイレイタンスーを生み出すのに十分な多さとなる。<sup>8)</sup> 同時に成長するき裂の集積は結果的に生じる破壊様式に影響してくる。もし同時に成長するき裂の集積度が高ければ、結果的に載荷軸方向から傾いた狭い幅に局所化したき裂を新しく発生させたり、進展させたりする。これは、たとえ供試体が一軸圧縮荷重下にあっても、応力分布が均一でも、岩石のせん断破壊となる。<sup>9), 10)</sup> せん断破壊は主に折れ曲がり引張き裂（ウィングき裂）の進展を妨げる側圧を与えることによって発生する。これは側

<sup>†</sup> 原稿受理 平成 19 年 1 月 30 日 Received Jan. 30, 2007 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

<sup>\*</sup> 正 会 員 徳山工業高等専門学校土木建築工学科 〒745-8585 周南市学園台, Dept. of Civil Eng. & Architecture, Tokuyama College of Tech., Gakuendai, Syunan, 745-8585

<sup>\*\*</sup> 正 会 員 金沢大学大学院自然科学研究科 〒720-1192 金沢市角間町, Graduate School of Natural Sci. & Tech., Kanazawa Univ., Kakuma-machi, Kanazawa, 720-1192

圧荷重の増加により小さな、より密に存在する潜在き裂の進展を、さらに促進するためであると思われる。

破壊前の岩石内を進展する多くのき裂の存在は、それらが異なった荷重レベルに対して載荷された後、岩石供試体の任意断面の直接観察することにより確認されている。<sup>11)</sup>この観察では、載荷方向に進展したき裂や新たに発生したき裂が観察されている。新しい微小き裂を引き起こすことのできる側圧荷重増加により、二次き裂が発生する過程に移ることが予測される。新しいき裂が発生する根拠はダイレイタンスー開始段階、すなわち近似的には圧縮強度の半分に到達した後<sup>8)</sup>の AE イベントの数における著しい増加等により認められる。

圧縮荷重下の岩石の脆性破壊のメカニズムに関する研究の多くは、二次元の破壊に限られてきた。しかしながら、岩石破壊の本質的な解明は破壊過程の三次元的特性を考えることなしには達成できない。現在までの三次元的な脆性破壊の基本的な理論展開は、主に楕円き裂の場合を仮定して議論されている。<sup>12)~14)</sup>これらは、圧縮荷重下の脆性破壊を説明するためには有用な資料となろう。

以上の議論は三次元的に考え、巨視的に捉えて、物体が近似的に均質性が高いと判断される場合に限定されている。巨視的な不連続面を含む場合は不連続面と母体との境界で応力集中が起こるため、この不連続面に依存した破壊が発生するものと考えられる。これについては、前述のウィングき裂に関連した破壊が予測されるが、このウィングき裂は破壊力学という変形様式のモードⅡに強く依存する場合であり、三次元の複雑な圧縮荷重下ではモードⅢの変形様式の影響も考える必要がある。

断層型の地震は破壊力学的なアプローチが必要であるといわれる。しかし、断層型地震による岩盤の破壊は断層面で発生し、アスペリティなどが関係した断層面のずれに代表される。このずれにより断層面と母体との境界はどういう状況にあるかということは興味のあるところである。本研究では、これまでに例をみない巨視的な不連続部を有する圧縮荷重下の材料の破壊を検討するため、アクリル樹脂供試体とモルタル供試体による圧縮載荷試験を行った。き裂面は供試体断面積の半分を占める大きさを持つものとし、破壊力学の変形モードとしては純粋なモードⅡおよびモードⅢの変形様式が実現される前例のない供試体を考えた。なお、き裂面は閉塞し、接触した状態で変形および破壊が生じるようにした。

## 2 二次元および三次元物体内のき裂の進展特性

圧縮荷重下のき裂の進展は主に、モードⅡとモードⅢの変形様式が支配的になる。ここでは、このことを考慮して、モードⅡとモードⅢの変形様式でのき裂の進展特性について記述する。Fig. 1 はき裂面に対して  $45^\circ$  の方向に圧縮応力を無限遠方で受ける場合のき裂進展瞬間時のエネルギー解放率を有限要素解析で求めたものである。<sup>15)</sup>この解析ではき裂面がオーバーラップしないようにした接触条件を導入しており、き裂面に表面力は生じるが変形様式としては純粋なモードⅡとなる。折れ曲がり角がゼロはもとのき裂面方向に進展することを意味しており、

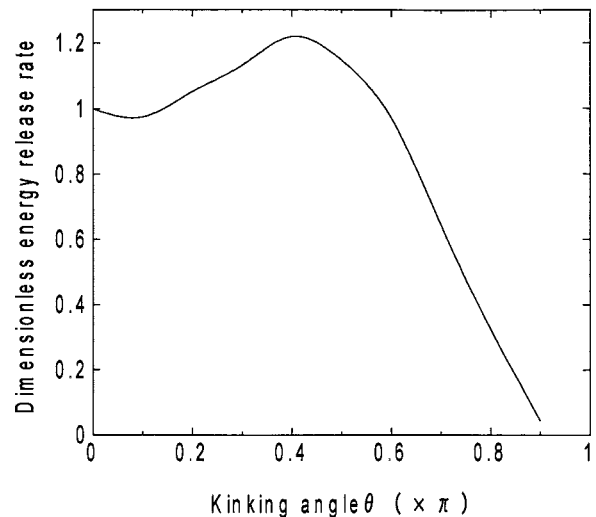


Fig. 1 Energy release rate on the onset of kinked crack in mode Ⅱ.

得られたエネルギー解放率は折れ曲がり角が0の場合のエネルギー解放率で無次元化している。この図よりエネルギー解放率は折れ曲がり角が  $0.4\pi$  ( $72^\circ$ ) 近傍でエネルギー解放率最大を示しており、周知の最大周応力説<sup>16)</sup>と極めて似た傾向となる。このモデルではもう一方のき裂の同様な傾向があり、よく知られたウィングき裂を説明できる。

Fig. 2 は無限遠方で面外せん断応力を受けるき裂(モードⅢ)のき裂進展瞬間時のエネルギー解放率の有限要素解析結果である。<sup>17)</sup>図中、実線はき裂面に平行な面外せん断を受ける場合であり、破線はき裂面に対して  $45^\circ$  をなす面に面外せん断を受ける場合である。Fig. 1 同様、折れ曲がり角0がもとのき裂面方向に進展することを意味しており、折れ曲がり角が0の場合のエネルギー解放率で無次元化している。いずれの場合も、折れ曲がり角が0で最大エネルギー解放率を示しており、モードⅠと同

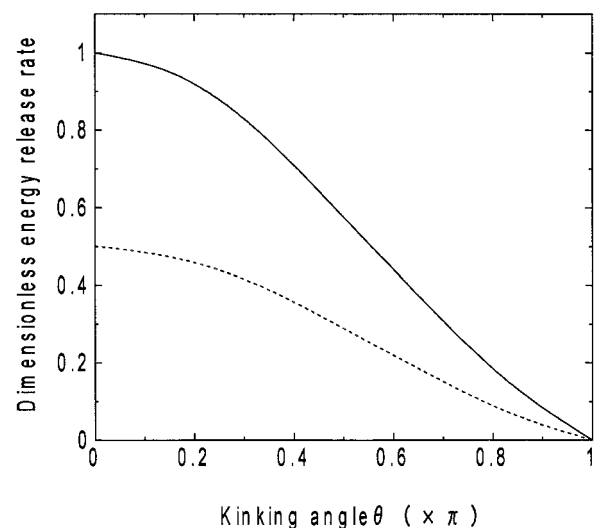


Fig. 2 Energy release rate on the onset of kinked crack in mode Ⅲ.

じようにもとのき裂面に沿って進展してゆく挙動が確認できる。

実験的にも、アクリル樹脂のような脆性度の非常に高い、線形等方弾性体に近い挙動を示す材料で薄い板状の試験片で実験を行えば、同じようなき裂進展結果が得られる。しかし、厚い平面ひずみを近似するような試験片になると、進展したき裂面は曲面を呈する傾向にある。たとえば、100mm × 100mm × 30mm のアクリル樹脂版の中央に载荷軸と 45° をなすように長さ 30mm のき裂を加工して一軸载荷を行うと Fig. 3 に示すようにき裂は任意の 1 点から生じ、爪に似た曲面を持ったウィングき裂となる。また花崗岩などの鉱物粒子により構成される岩石では鉱物粒子間の境界や黒雲母のへき開等の弱面を選択的に進展する傾向がある。<sup>18)</sup>

モード II やモード III の変形様式を岩石に適用するとかなり複雑なき裂の進展を与える。Backers 等は相対する 2 本のき裂面に押し抜きせん断型の载荷によってモード II の変形様式を花崗岩、大理石および石灰石に与えてモー

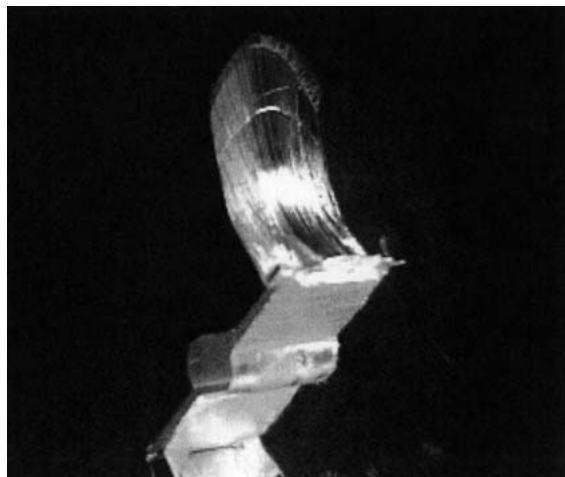


Fig. 3 Crack extension behavior in Mode II for acrylic resin specimen.

ド II の破壊靱性試験を行っている。<sup>19)</sup> 最初のき裂の発生は下方のき裂からのウィングき裂によって起こるが、供試体自由面の境界条件に関連して、上方のき裂からき裂に垂直なき裂（この報告ではドーナツき裂と言及している）が発生しており、最終的にはき裂間の複雑な応力干渉に関係して、エシュロンき裂も発生している。Cox and Scholz は円筒供試体の円周に切り欠きを加工し、ねじりを与えることにより、花崗岩供試体と石灰石供試体にモード III の変形様式を実現している。<sup>20), 21)</sup> この供試体の破壊は斜め引張りき裂に代表され、それらが結合することにより、せん断なき裂が形成される。また周りにはらせんき裂や軸方向き裂も観察されている。

本研究ではこれらの実験より、これまでに例のないかなり簡易的な方法で純粋モード II 変形様式および純粋モード III 変形様式を実現した。

### 3 純粋面内および面外せん断型 三次元供試体による破壊実験

#### 3・1 供試体と実験方法

Fig. 4 (a) に示すように、直方体の側面から下方あるいは上方に傾きを設けてき裂を設置して、上面と底面から圧縮すると、载荷応力は右図のようにき裂面に垂直な方向の応力と、き裂面を滑らせるようなせん断応力およびき裂面に垂直な方向のせん断応力に分解される。ここでき裂面に垂直な応力はき裂面に摩擦がない限り、き裂進展には影響を及ぼさないが、き裂面同士が接触すると明らかに摩擦は生じるので、せん断応力による変形を妨げる働きをする。また、き裂面に垂直な方向のせん断応力もき裂進展には影響を及ぼさない。したがって、このような荷重を与えた場合は、変形様式的には純粋なモード II となる。また Fig. 4 (b) のように側面に垂直なき裂面を持つき裂を、隣り合う側面から角度を付けて斜めに設置して上面と底面から圧縮すると右図のように载荷圧縮応力はき裂面に垂直な方向の応力と 2 つの面外せん断応力に分解される。摩擦についてはモード II と同じような解

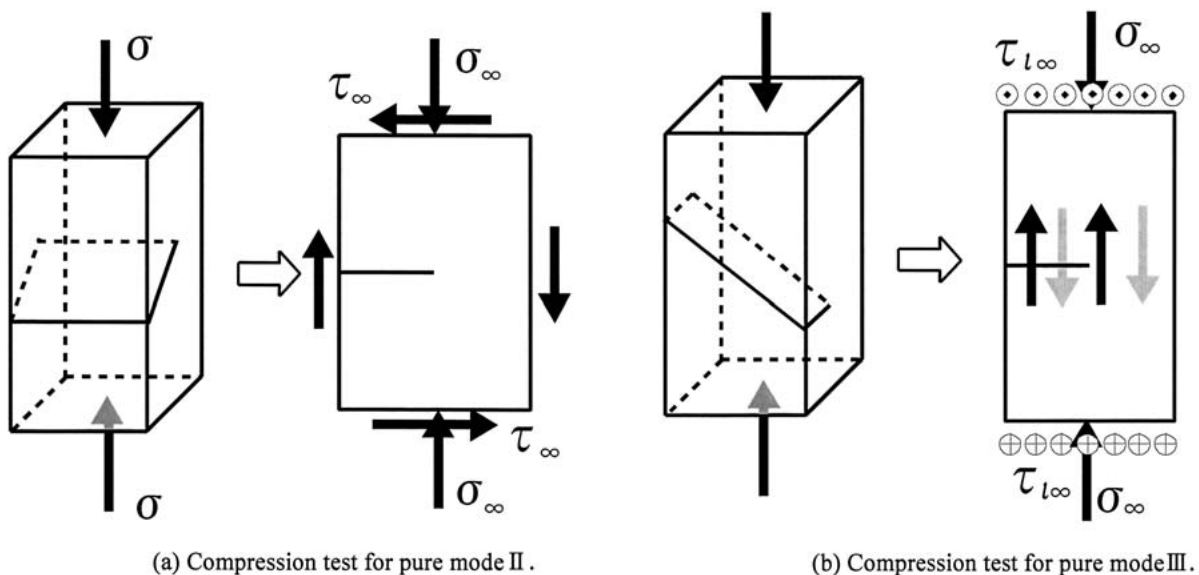


Fig. 4 Summary of loading and specimen for compression test in mode II and mode III.



となるが変形様式的には、モードⅢが実現できる。

供試体寸法はアクリル樹脂供試体、モルタル供試体共に  $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 120\text{mm}$  とし、き裂はき裂面の中央が1側面の中心に来るように、モードⅡ供試体、モードⅢ供試体それぞれ  $45^\circ$  の角度を付けて設置した。き裂はアクリル樹脂供試体については外注したが、き裂幅は2mm程度であった。モルタル供試体のき裂は、厚さ0.5mmのアクリル板を設置して打設し、半硬化の状態で引き抜くことにより設置した。き裂先端は供試体側面の中央に位置する深さにあるものとしたので、リガメントの面積とき裂面の面積は等しい。供試体はアクリル樹脂供試体をそれぞれ2本、モルタル供試体をそれぞれ3本作成した。それぞれの1本については厚さ0.4mmのステンレス板に油を付けてき裂面に挿入し、き裂面の摩擦の軽減を図った。モルタルに用いた砂は標準ふるいの2.5mmを通過して、0.6mmにとどまる海砂を用いた。モルタルの水セメント比は0.5とし、セメントと砂の重量比は1:2とした。

実験には油圧サーボ式材料試験機（島津サーボパルサ EHF-EUB-20L型）を用い、付属のロードセルから載荷試験制御用の制御装置内蔵のロードアンプを通して、ひずみ測定器（東京測研究所；THS-1100）からGP-IBインターフェイスを介してコンピューターに取込んでいく。載荷は  $3 \times 10^{-3}\text{mm/sec}$  の変位制御で載荷した。

### 3・2 実験結果

**3・2・1 アクリル供試体** Fig. 5はモードⅡ試験のき裂面に油を塗布したステンレス板を噛ましていないアクリル樹脂供試体のき裂発生状況である。このようにき裂面に細工を施していない供試体では4つの任意の大きさを持つウィングき裂が発生した。油を塗布したステンレス板をき裂面に設置したものは、き裂先端中央から爪のようなひとつのウィングき裂が発生した。Fig. 6はこれらの実験に対する、せん断応力のみにより評価した応力拡大係数と変位の関係および載荷応力と変位の関係を示している。破線がき裂面にステンレス板の挿入した結果であるが双方に顕著な差は現れなかった。アクリル樹脂版の破壊靱性は  $1.2 \sim 1.8\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$  程度であるので、<sup>22)</sup> き裂面にはかなり大きい摩擦力が働いていることがわかる。アクリル樹脂の圧縮強度は  $123.6\text{MPa}$  であることに

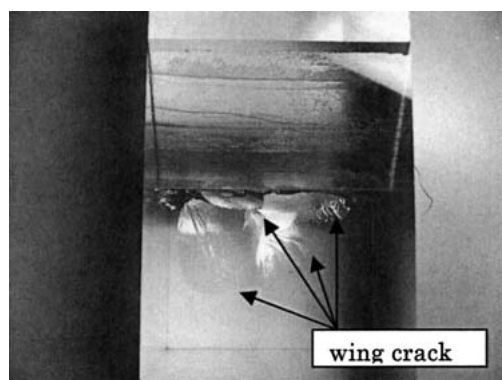


Fig. 5 Crack extension behavior in mode II for acrylic resin specimens with coarse crack surface.

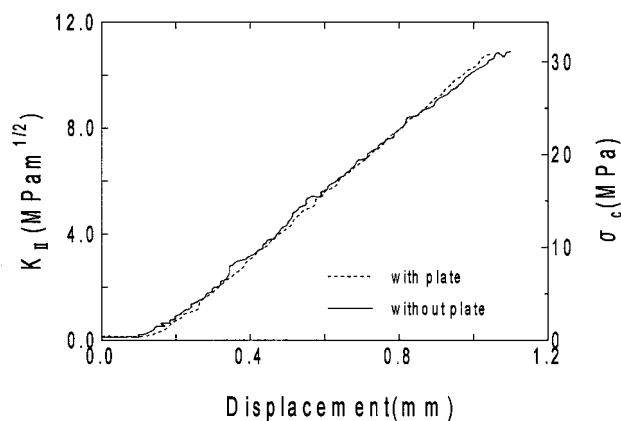


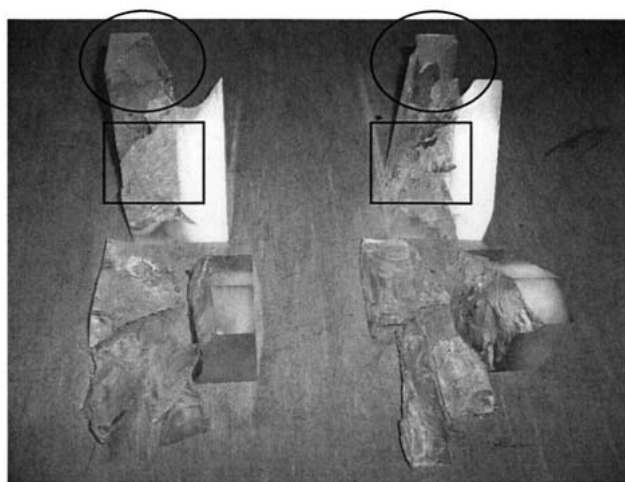
Fig. 6 Loading conditions of mode II for acrylic resin specimen.

対し、き裂発生時の載荷面の載荷応力は  $30\text{MPa}$  程度であるので、破壊は初期き裂に大きな影響を受けている。

Fig. 7 (a) はモードⅢ試験のアクリル樹脂供試体の破壊状況である。右の供試体がき裂面にステンレス板を設置したものであるが、双方ともき裂進展の際、大きな音と共に一瞬にして粉々に砕け散るような破壊となった。したがってこの写真は両面テープで飛び散った破片の一部を付着させて撮影したものである。破壊面は、縦に割れた一部はモードⅠ試験結果の破断面のように滑らかな面（楕円内、Fig. 7 (b)）となったが、多くの面は凹凸の激しい面となっている。き裂先端付近では、き裂面に添った破壊面も存在している（四角内、Fig. 7 (c)）が、その面はかなり平滑度が低く複雑な破壊となっている。多くの破片は下方の破壊片に見られるように縦割りにより生じたと考えられるものが多かった。Fig. 8はこの実験に対する、せん断応力のみにより評価した応力拡大係数と変位の関係および載荷応力と変位の関係を示している。破線がき裂面にステンレス板の挿入した結果であるが、き裂面を滑らかにした方が高い耐力を有していた。

Fig. 9はモードⅡ供試体とモードⅢ供試体のき裂面の接触状態とせん断応力による供試体表面のき裂面の食い違い状況を示している。このように載荷によりき裂面は接触した状態で破壊に至っており、せん断応力による供試体表面のき裂面の食い違いは、モードⅡで1mm程度、モードⅢで2mm程度観察された。

**3・2・2 モルタル供試体** Fig. 10にモードⅡ試験のモルタル供試体のき裂発生状況を示す。アクリル樹脂供試体と同様、き裂先端からウィングき裂が発生するが、そのウィングき裂は発生直後、圧縮応力により閉じる。最終的には初期き裂の先端からウィングき裂とは反対方向に、上に向けて伸びるき裂により破壊する。Fig. 11はこの実験に対する、せん断応力のみにより評価した応力拡大係数と変位の関係および載荷応力と変位の関係を示している。図中の記号は写真の記号に対応している。Ⅱ-3がき裂面にステンレス板の挿入した結果である。これにより、き裂面を滑りやすくすることにより、ウィングき裂の発生を促進する傾向にある。またいずれの供試



(a) Summary of fracture conditions of acrylic resin specimens for mode III loading.



(b) Fracture surface by splitting



(c) Fracture along the crack surface.

Fig. 7 Fracture conditions of acrylic resin specimens for mode III loading.

体でも、ウィングき裂発生の瞬間、急に荷重が上がるような挙動を示した。これはウィングき裂の発生により比較的大きな変形をしようとするがそれが載荷板によって押さえられたため生じたものと考えられる。モルタルの破壊靱性値は  $0.5 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$  程度であると考えられるので、

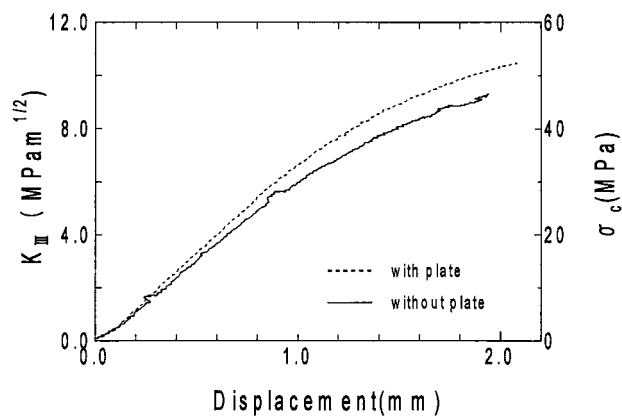
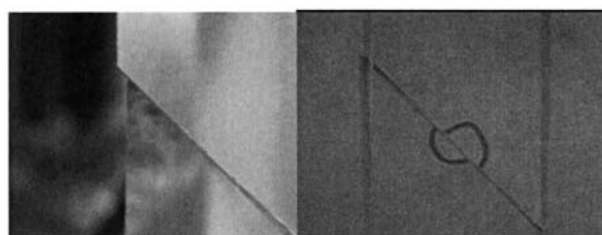


Fig. 8 Loading conditions of mode III for acrylic resin specimen.



(a) Mode II specimen (b) Mode III specimen

Fig. 9 Contact of crack surface and difference by shear force in loading.

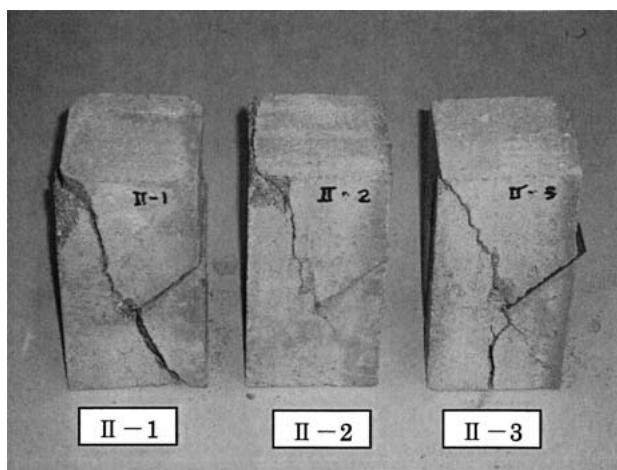


Fig. 10 Fracture conditions of mortal specimens for mode II loading.

モルタルのき裂面にも大きな摩擦力が働いていることがわかる。また円柱供試体を用いた静的試験結果では圧縮強度は  $46.3 \text{ MPa}$  であったので、破壊は初期き裂による破壊であることがわかる。

Fig. 12 にはモード III 試験のモルタル供試体のき裂発生状況を示す。ここで、III-1 供試体と III-3 供試体はき裂面から縦割り破壊によって破壊した。III-2 供試体は縦のき裂を複数含みながら、き裂面をほぼすべるような破壊を起こした (Fig. 12 (a) の III-2 供試体, Fig. 12 (b)). またこの面は比較的平滑な面となっていた。Fig. 13 はこ



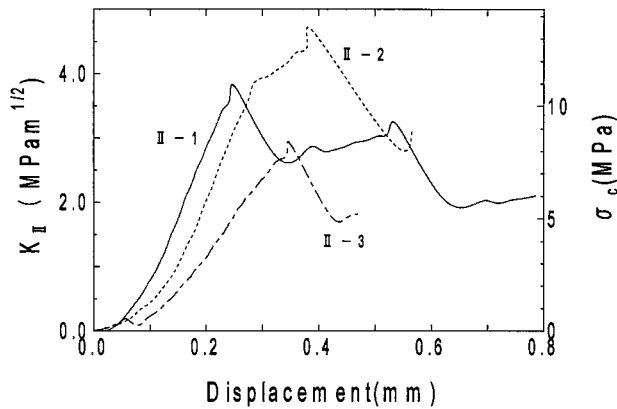


Fig. 11 Loading conditions of mode II for mortal specimens.

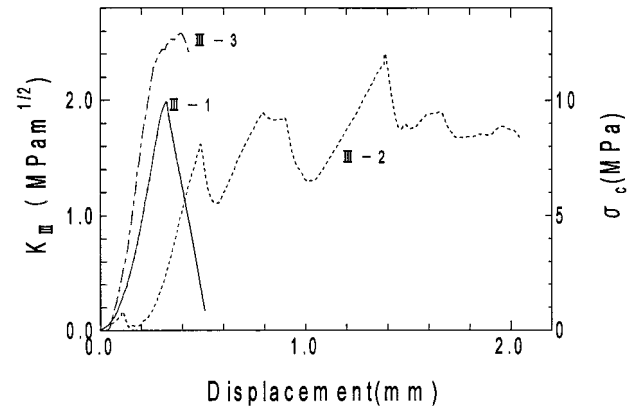
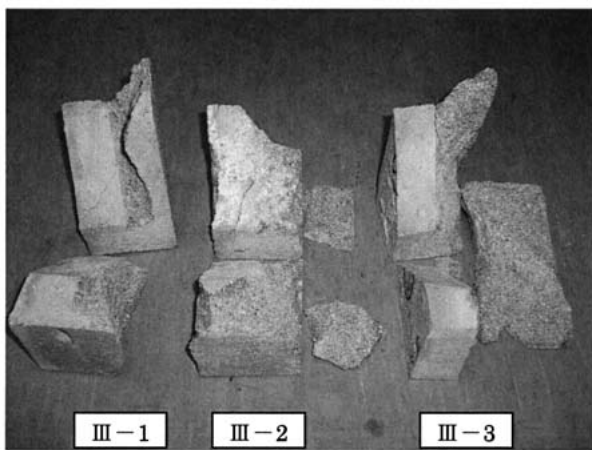
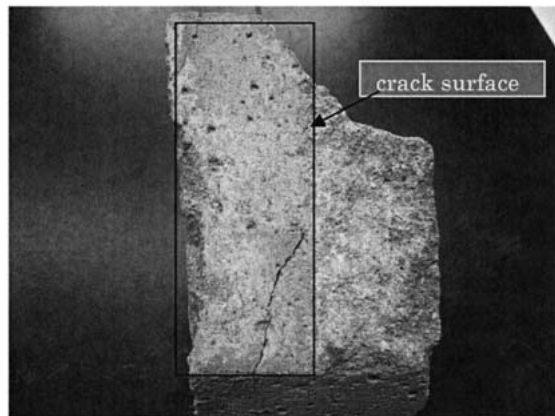


Fig. 13 Loading conditions of mode III for mortal specimens.



(a) Summary of fracture conditions of mortal specimens for mode III loading.



(b) Fracture along the crack surface.

Fig. 12 Fracture conditions of mortal specimens for mode III loading.

の実験に対する、面外せん断応力のみにより評価した応力拡大係数と変位の関係および載荷応力と変位の関係を示している。図中の記号は写真の供試体に対応している。ここでⅢ-2 供試体は縦き裂の発生と閉塞を繰り返しながら、き裂面をすべるような破壊に至った。Ⅲ-3 供試体はき裂面にステンレス板を挿入して実験したものであるが、ここではモードⅡ試験とは反対に破壊を抑制する効果となっている。

#### 4 結 言

本研究では、比較的広いき裂面を持つ矩形供試体にモードⅡとモードⅢの変形様式が生じるような載荷を考え、き裂面が接触した状態からの破壊を検討した。供試体材料としては均質なものとして、アクリル樹脂とモルタルを選択した。その結果、次のような所見が得られた。

(1) モードⅡ変形様式の実験ではすべて、周知のウィングき裂により破壊が開始する。モルタル供試体では発生したウィングき裂は載荷により閉塞してしまうので、初期き裂から、ウィングき裂の反対方向に伸びるき裂により最終的な破壊に至る。

(2) モードⅢの変形様式の実験では、アクリル樹脂供試体については、破壊力学で扱うき裂の進展が捉えにくいような激しい音を伴って多くの破片が飛び散るような破壊となった。それらの破片の多くは縦方向のき裂によるものであり、その面は載荷面近くでは平滑な面を持っているところもあった。しかし、き裂先端付近では凹凸の激しい面になっており、き裂面に添った破壊面も認められたが、その面は複雑な形状を呈していた。モルタル供試体については、3本の供試体のうち2本は初期き裂先端を含む縦割れ破壊に至ったが、他の1本は縦方向のき裂を含みながら、き裂面に添った破壊に至った。しかし破壊面はアクリル樹脂の面とはまったく異なった滑らかな面であった。

(3) モードⅢの変形様式の実験ではアクリル樹脂のほうはかなり複雑な破壊となり、破壊面も平滑度を欠いていたが、モルタル供試体では比較的平滑な破壊面が得られた。

モードⅡ変形様式についてはほぼ、統一的な見方が可能であるが、モードⅢ変形様式についてはさらに多くの資料が必要と考えられる。モードⅡのような一定の破壊挙動を見出そうとするなら、き裂面の摩擦をさらに軽減することやき裂の角度を変えることなどが必要になってくる。また材料の種類等によっても破壊は変化するものと考えられ、花崗岩等の岩石での実験も重要となる。

## 参 考 文 献

- 1) A. A. Griffith, "The phenomena of rupture and flow in solids", *Philosophical Transaction of the Royal Society of London, Series A* 221, pp.163-198 (1920).
- 2) A. A. Griffith, "The theory of rupture", *Proceedings of First International Congress on Applied Mechanics*, pp.55-63 (1924).
- 3) W. F. Brace and E. G. Bomolakis, "A note on brittle crack growth in compression", *Journal of Geophysical Research*, Vol.68, No.12, pp.3709-3713 (1963).
- 4) W. C. Moss and Y. M. Gupta, "A constitutive model describing dilatancy and cracking in brittle rocks", *Journal of Geophysical Research*, Vol.87, No.B4, pp.2985-2998 (1982).
- 5) Nemat-Nasser and H. Horii, "Compression-induced non-planar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst", *Journal of Geophysical Research*, Vol.87, No.B8, pp.6805-6821 (1982).
- 6) H. Horii and Nemat-Nasser, "Compression induced micro-crack growth in brittle solids : Axial splitting and shear failure", *Journal of Geophysical Research*, Vol.90, No.B4, pp.3105-3125 (1985).
- 7) M. F. Ashby and S. D. Hallam, "The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states", *Acta Metallurgica*, Vol.34, No.3, pp.497-510 (1986).
- 8) O. Sano, I. Ito and M. Takeda, "Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression", *Journal of Geophysical Research*, Vol.86, No.B10, pp.9299-9311 (1981).
- 9) T.-F. Wong, "Micromechanics of faulting in Westerly granite", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.19, pp.49-64 (1982).
- 10) Y. Du and A. Aydin, "Interaction of multiple cracks and formation of echelon crack arrays", *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.15, pp.205-218 (1991).
- 11) S. S. Peng and A. M. Johnson, "Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.9, pp.37-86 (1972).
- 12) L. N. Germanovich, R. L. Salganik, A. V. Dyskin and K. K. Lee, "Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression", *Pageoph*, Vol.143, No.1-3, pp.117-149 (1994).
- 13) L. N. Germanovich, L. M. Ring, B. J. Carter, A. R. Ingraffea, A. V. Dyskin and K. B. Ustinov, "Simulation of crack growth and interaction in compression", *Proceedings of the Eighth International Congress on Rock Mechanics*, Vol.1, pp.219-26 (1995) Balkema, Rotterdam and Brookfield.
- 14) L. N. Germanovich, B. J. Carter, A. R. Ingraffea, A. V. Dyskin and K. K. Lee, "Mechanics of 3-D crack growth under compressive loads", *Rock Mechanics*, Hassani & Mitri (edited), pp.1151-1161 (1996) Balkema, Rotterdam.
- 15) Y. Suzuki and C. Yatomi, "Finite element analysis of the energy release rate by using the E-integral under the compressive loads", *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, No.612/I-46, pp.251-263 (1999).
- 16) F. Erdogan and G. C. Sih, "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear", *ASTM, Journal of Basic Engineering*, Vol.85, pp.519-52 (1963).
- 17) C. Yatomi, K. Hashimoto and H. Ishida, "Finite-element analysis for energy release rate at the onset of crack kinking under inclined load using the E-integral", *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineerings, A* Vol.61, No.592, pp.2521-2528 (1995).
- 18) Y. Kudo, O. Sano, N. Murashige, Y. Mizuta, and K. Nakagawa, "Stress-induced crack path in aji granite under tensile stress", *Pure and Applied Geophysics*, Vol.138, No.4, pp.641-656 (1992).
- 19) T. Backers, Q. Stephansson and E. Rybacki, "Rock fracture toughness testing in Mode II-punch-through shear test", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.39, pp.755-769 (2002).
- 20) S. J. D. Cox and H. Sholz, "On the formation and growth of faults : an experimental study", *Journal of Structural Geology*, Vol.10, No.4, pp.413-430 (1988).
- 21) S. J. D. Cox and H. Sholz, "Rupture initiation in shear fracture of rocks : an experimental study", *Journal of Geophysical Research*, Vol.93, No.B4, pp.3307-332 (1988).
- 22) K. Hashimoto, "Consideration on evaluation of fracture toughness and testing methods", *Research Reports of The Tokuyama College of Technology*, No.27, pp.17-22 (2003).