圧縮荷重下の純粋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

橋本 堅一1*

1徳山工業高等専門学校 土木建築工学科(〒745-8585山口県周南市学園台) *E-mail: hasimoto@tokuyama.ac.jp

本研究ではモードⅢのき裂変形様式のき裂先端近傍の応力状態を考察したのち,花弁き裂が観察されて いるPMMAと同質なアクリル樹脂供試体を用いた圧縮荷重下の純粋モードⅢき裂変形様式の実験を行い, その破壊メカニズムを検討した.そして,岩質材料と考えることのできるモルタルで同様な実験を行い, 材料によるモードⅢ圧縮荷重下の破壊特性の違いについても考察した.き裂先端近傍の応力場は純せん断 状態にあり,き裂先端軸に対して45度の方向に大きな引張応力が作用する.この応力状態ではその引張応 力に垂直な方向にき裂が発生することが予測される.これに対して,アクリル供試体では,初期き裂先端 軸と交差する小さなき裂が発生し,そのき裂が発生直後に花弁き裂に移行していくことが確認された.

Key Words : mode III crack deformation, compressive loading, crack extension, fracture behavior

1. はじめに

断層型の地震の挙動は理論的には説明しにくい現象と 考えられる.断層をき裂ととらえて地震の発生メカニズ ムを考察することが数年前から行われており,多くの報 告が存在する.き裂が圧縮荷重を受けるとき,き裂の変 形様式は面内せん断型(モードII)と面外せん断型(モ ードIII)の変形様式が支配的となる.このうちモードII ではウィング型のき裂が支配的になるとされており¹⁾, モードIIIでは材料によって,エシュロンき裂群が観察さ れること^{2,3}や花弁き裂(petal crack)が認められる^{4,5}こと が報告されている.溝を有する円筒岩石供試体のねじり 実験ではモードIIIにき裂変形様式により発生したエシュ ロンき裂群が元のき裂面に平行な進展き裂により連結さ れ,せん断過程領域を形成し,最終的には狭い幅の破砕 領域となってせん断破壊が生じるとことが見出されてい る^{2,3}.

モードIIとモードIIの混合モードとなる圧縮荷重下の 半円形内部き裂の実験では、ウィングき裂や花弁き裂等 が観察されており、数値解析である程度の説明も試みら れている^{5,0,7}.これらの報告においてはき裂間の相互の 干渉についても一部扱われている.半楕円の表面き裂で の実験でも、内部き裂と同じようにウィングき裂や花弁 き裂が確認されている^{4,8}.また、花崗閃緑岩を用いた 表面半楕円き裂の実験においては、いわゆるアンチウィ ングき裂も観察されており、デジタルスペックル相関法 (DSCM) や三次元アコースティックエミッション (AE) 位置評定システムを用いて,各々き裂の発生状 況やせん断ひずみの集中なども考察されている⁹. さら に,最近の数値解析的な研究では,材料の均質性と表面 半楕円き裂の傾斜角をパラメータとして,発生・進展す るき裂がシミュレートされている¹⁰.

本研究ではモードIIIのき裂変形様式のき裂先端近傍の 応力状態を考察したのち,花弁き裂が観察されている PMMAと同質なアクリル樹脂供試体を用いた圧縮荷重 下の純粋モードIIIき裂変形様式の実験を行い,その破壊 メカニズムを検討した.そして,岩質材料と考えること のできるモルタルで同様な実験を行い,材料によるモー ドIII圧縮荷重下の破壊特性の違いについても考察した. 前報¹⁾では、モードIIIのき裂変形様式のアクリル樹脂供 試体では亀裂進展を詳しく確認する前に爆裂的な破壊を 起こしたため,き裂進展特性を把握することができなか ったが,今回は供試体寸法とき裂幅を改善して,統一的 なき裂発生・進展挙動を考察できた.

2. モード皿のき裂変形様式のき裂先端近傍の応力 状態

図-1のような円筒座標を考え, x - z面にき裂面が存在 すると仮定すると、き裂近傍の応力成分は距離rの-1/2 のオーダーの異方性を持つ第1項は



図-1 円筒座標による応力成分

$$\begin{cases} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{r\theta} \end{cases} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \begin{cases} \frac{5}{4}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{1}{4}\cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ \frac{3}{4}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4}\cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ \frac{1}{4}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4}\sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{cases} \\ + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \begin{cases} -\frac{5}{4}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{3}{4}\sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ -\frac{3}{4}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{3}{4}\sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ \frac{1}{4}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{3}{4}\cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{cases} \\ \end{cases} \\ \begin{cases} \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} \end{cases} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{cases} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{cases}$$
(1)

で表される.式(1)中の応力拡大係数Kは、物体やき裂面の形状寸法、境界条件によって決まる.たとえば物体を 無限と仮定して、その中央にx軸に沿って、長さ2aのき 裂が存在し、無限遠方に $\sigma_y^{\circ\circ}$ 、 $\tau_{xy}^{\circ\circ}$ 、 $\tau_{yz}^{\circ\circ}$ の荷重が作用し ているとした場合、応力拡大係数は次式のようになる.

 $K_{I} = \sigma_{y}^{\infty} \sqrt{\pi a}, \quad K_{II} = \tau_{xy}^{\infty} \sqrt{\pi a}, \quad K_{III} = \tau_{yz}^{\infty} \sqrt{\pi a}$ (2)

いま、図-2のように、平行6面体のなかに、一辺が自 由面と平行になる長方形ABCDのき裂が物体内部にγ傾 いて存在しているとする.したがって、仮にこの6面体 に、図-2のように3主応力が作用した結果のき裂の辺 AD,辺BCが斜面に沿って進展し、それぞれ平行6面体 の上面、下面まで進展し、その結果、上面の一部が斜面 に沿ってすべり落ちたと仮定すれば、地表面を上面と考 えた時が正断層、右の面と考えた時が逆断層となる.一 方、3主応力が作用した結果、長方形ABCDのき裂の辺 AB、辺CDが、斜面に沿って平行6面体の手前と裏面ま で進展したと仮定すれば、地表面を手前の面と考えれば 右横ずれ断層、裏面と考えれば左横ずれ断層となる.し



図-2 物体内部のき裂進展



図-3 ウィング型き裂のエシュロンき裂

かし、き裂の破壊力学的観点から考察すれば、実際は上記のような簡単な現象にはならないことは容易に理解できる.図-2のような平行6面体にσ₁<σ₂<σ₃なる3主応力が作用している時、長方形ABCDの辺DA、辺BCであるき裂面先端の破壊モードは、モードIIの面内せん断型であり、辺AB、辺CDのき裂面先端は、モードIIの面外せん断型状態にある.モードII状態にあるき裂面では、図-2のき裂面を手前方向から見た場合を図-3とすると、き裂面先端の点A、Bから時計回り方向への折れ曲がりき裂がよく観察される.これは、き裂面がすべった結果、辺DA、辺BCのき裂面先端近傍に、き裂面内の方向とは



図-4 モードⅢき裂変形様式により発生する エシュロンき裂

異なる方向に大きな引張応力が生じるためである.き裂 面は、その角度でモードΙの開口型の状態で折れ曲がっ て進展し、最終的には最大圧縮応力の方向に進展する. この折れ曲がりき裂面をウィング型き裂と呼ぶ.次にモ ードⅢの面外せん断型状態にある、辺ABからなるき裂 面先端近傍の応力状態を図-4に記す.A点を原点とし、 *x*軸を辺DAの延長線上に、*y*軸を面ABCDと垂直に、*z*軸 を辺BAの延長線上にとる.図-3においてσ₁軸から時計 回りにγ傾斜した面の断応力は次式で与えられる.

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) sin\gamma cos\gamma \tag{3}$$

図-2の平行6面体が無限に大きいと仮定すると、式(2)中の応力拡大係数 K_{m} は、ABの長さが2aであれば、

 $K_{\rm III} = (\sigma_1 - \sigma_3) siny cos \gamma \sqrt{\pi a} \tag{4}$

となる. これを式(1)に代入すると, 0=0で,

$$\begin{cases} \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} \end{cases} = \begin{cases} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \gamma \cos \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \\ 0 \end{cases}$$
 (5)

となる. この応力状態は図-4の左の正方形のような純粋せん断状態にある. したがって,図-4の右の正方形の図のように,辺ABから時計と反対回り方向にπ/4傾いた方向のき裂面ABの近傍に,非常に大きな引張応力が作用する. したがって,図-4のように,辺ABから時計回りの方向にπ/4傾いたモードIの開口き裂面がで



図-5 純粋モードⅢき裂変形様式の実験概要

きる.この開口き裂面は、図-3のように、ある一定の 間隔を持って観察されるため、エシュロン(雁行)き裂 と呼ばれる.以上の議論から、図-2のような平行6面 体にσ1<σ2<σ3のなる3主応力が作用している物体内に 最も簡単な方向にある長方形 ABCDのき裂でも、結局 その面内に進展しないことになる.Scholzら²⁹⁾は、上記 のエシュロンき裂の発生後、さらに荷重を大きくすると エシュロンき裂が長方形 ABCDのき裂の面と平行な進 展き裂により連結され、せん断過程領域を形成し、最終 的には狭い幅の破砕領域となってせん断破壊が生じると 述べている.しかし、エシュロンき裂やせん断領域(せ ん断帯とも呼ばれる)は、実際の断層にもしばしば見ら れるが、純粋なせん断破壊と思われるせん断き裂やずれ 断層も、岩石実験や地表面に数多く観察されている.

3. 実験概要

(1) 実験供試体

供試体は直方体とし、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.図-5に示すように、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、一軸圧縮載荷を行うことで、純粋なモードIIIの実験が可能となる.

本研究では実験供試体に、均質で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と、岩石に似 た挙動を示すモルタルを使用した.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.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

表-1 供試体の概要

	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 <i>a</i> (mm)	25, 20, 15	50, 40
初期き裂角度 θ	45°, 30°	45°, 30°



図-6 き裂両端から発生した花弁き裂(30D15CL供試体)

を視覚的に捉えることができる. 圧縮強度は123.6MPaで ある. 初期き裂の設置は外注し,き裂幅は1mm程度であ る. モルタルは,標準砂を用い,水セメント比を0.60, セメントと砂の質量比を1:2とした. 円柱供試体の28日 圧縮強度は36.6MPaであった. モルタル供試体の初期き 裂については,厚さ0.4mmのアクリル板を設置して打設 し,半硬化状態で引き抜くことにより作成した. 表-1に, 供試体寸法および初期き裂寸法を示す. アクリル樹脂の 場合,供試体寸法は30×30×100mmの直方体とし,き裂長 さ*a*を25mm, 20mm,15mm,角度*θ*を30°,45°のいずれか とした. モルタルの場合,供試体寸法は60×60×200mmの 直方体とし,初期き裂はき裂全ての長さ*a*を50mm, 40mm,角度*θ*を30°,45°のいずれかとした. 供試体は, 例えば初期き裂角度(degree) 30°,長さ(crack length) 25mmの場合,30D25CLというように呼名を付けた.

(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ーに 取り込んでいる.また,供試体の背後よりビデオ観察を 行った.載荷は,載荷速度0.5×10²mm/secの変位制御とし ,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.

実験に際しては、き裂面を滑りやすい状態にするため、 0.75mmのアクリル板を初期き裂に挿入した.



図-7 連なって発生した花弁き裂(30D25CL供試体)

4. 実験結果

(1) アクリル供試体

き裂の発生はすべての供試体で,き裂の端から発生し て,図-6に示されるような片側から発生する連続的な複 数の花弁き裂あるいは図-7に示すようなき裂の両端また は片側端から発生する大きな広がりをもつ花弁き裂が観 察された.連続的な複数の花弁き裂はリガメント長さが 短い(き裂長さが長い)供試体で見られ,端で大きく広 がる花弁き裂はリガメント長さが長い供試体で見られた. 図-8は30D20CL-2の供試体のき裂の発生の様子である. この写真には初期き裂軸と交差する小さなき裂が観察さ れる.このき裂により初期き裂からのき裂の発生は2章 で述べたエシュロンき裂の発生要因から説明でき,その き裂が発生直後に花弁き裂に移行していくものと推察さ れる.

(2) モルタル供試体

図-9に、代表的なモルタル供試体でのき裂の発生状況を示 す. 図-9(a)は初期き裂挿入面の背後面のき裂の様子で あり、図-9(b)は初期き裂挿入面のき裂の様子である. さらに、図-9(c),(d)は、供試体の下半分の破壊面を異な る角度から観察したものである. モルタル内部に存在す る空隙等による弱面の影響から、まず初期き裂に沿った き裂の進展が見られる(図-9(a),①). このき裂は圧縮 応力により閉じ、摩擦によって保持され、最終的には縦 割れ破壊に至る(図-9(a),②). 初期き裂先端からは初 期き裂軸に交差するき裂が発生していることが確認でき る (図-9(b)). このき裂は, 初期き裂先端が 叉-4 で示した応力状態になったために発生したものと考えら れる. さらに初期き裂端部の破壊面の形状から, 花弁き 裂と同様のき裂が発生していると考えられる(図-9 (c),(d),四角内). したがって、初期き裂軸に交差する



図-8 エシュロンき裂

き裂の発生直後に花弁き裂へと移行し、最終的に縦割れ 破壊に至ったと推察される.

5. おわりに

本研究では、モードⅢき裂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およびモルタル 供試体に一軸圧縮載荷試験を行い,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.

- (1)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、成長した花弁き裂により最終的な破壊 に至る.また、初期き裂先端に見られるエシュロンき 裂の発生直後に花弁き裂へと移行しているものと考え られる.
- (2)モルタルでは、全ての供試体において、まず初期き裂 に沿ったき裂の進展が見られる.初期き裂に沿ったき 裂により破壊に至る場合もあるが、多くの供試体は、 その後、花弁き裂の発生に伴い縦割れ破壊に至る.初 期き裂に沿ったき裂の発生は、モルタル内部に存在す る空隙等による弱面の影響が関係しているものと考え られる.
- Officient

 Officient

 Officient
 - (a) 初期き裂に沿ったき裂と縦割れ

(b) エシュロンき裂



⁽c) 花弁き裂

(d) 花弁き裂2

(3)アクリル樹脂供試体とモルタル供試体では、同じ載荷 系を有した実験を行ったにもかかわらず、それぞれ異 なる破壊が見られたことから、モードⅢき裂変形様式 の実験でも、材料の種類によって破壊の性状が変化す ると言及できる.

以上のように、アクリル樹脂とモルタルのそれぞれの 材料において、ほぼ統一的なき裂進展および破壊挙動が 見られた.今後は様々な実際の岩石に適用して、それぞ れの岩石での統一的なき裂進展および破壊挙動を把握す ることが重要である.

現在のところ、一連の報告の目的にあるような断層の 運動を解明することは容易でないが、モードⅢのき裂変 形様式の破壊については有用な資料が得られたものと思 われる.

参考文献

- 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.
- Cox, S. J. D. and Scholz, C. H. : Rupture initiation in shear fracture of rocks: an experimental study, *Journal of Geothysical Reserch*, Vol. 93, No. B4, pp.3307-3320, 1988.
- Cox, S. J. D. and Scholz, C. H.: On the formation and growth of faults: an experimental study, *Journal of Structural Geology*, Vol. 10, No. 4, pp.430-430, 1988.
- 4) Wong, R. H. C., Law, C. M., Chau, K. T. and Zhu, W.: Crack propagation from 3-D surface fractures in PMMA and marble specimens under uniaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, CD-ROM, Vol.41, No.3, pp.360-365, 2004, Elsevier Ltd.

- Germanovich, L. N., Ring, L. M., Carter, B. J., Ingraffea, A. R., Dyskin, A. V., and Ustinov, K. B., : Simulation of Crack Growth and Interaction in Compression, 8th International Society for Rock Mechanics Congress, pp.25–29, 1995.
- Germanovich, L. N., Salganik, R. L., Dyskin, A. V. and Lee, K. K. : Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 143, No. 1/2/3, pp.117-149, 1994.
- 7) Germanovich, L. N., Carter, B. J., Ingraffea, A. R., Dyskin, A. V. and Lee, K. K. : Mechanics of 3-D Crack Growth under compressive loads, *Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium*, NARMS'96. Rotterdam and Brookfield, Balkema, pp. 1151–1160, 1996.
- 8) Chau, KT, Wong, RHC. Wong, Y L, Lai, KW, Wong, LX, Chan, YW, Wong, WT, Guo, YSH, Zhu, W and Zheng, SH : Three-dimensional Surface Cracking and Faulting in Dangan Islands Area, South of Hong Kong, *Proceedings of the 3rd international conference on continental earthquakes*, Beijing, China, 12–14 July, 2004.
- Liu, LQ, Liu, PX, Wong, C, Ma, SP and Guo, YS : Experimental investigation of three-dimensional propagation process from surface fault, *Science in China Series D: Earth Sciences*, Vol. 51, No. 10, pp.1426– 1435, 2008.
- Liang, ZZ, Xing, H, Wang, SY, D. J. Williams and Tang, CA : A threedimensional numerical investigation of the fracture of rock specimens containing a pre-existing surface flaw, *Computers and Geotechnics*, Vol. 45, pp.19-33, 2012.

EXPERIMENTAL STUDY ON FRACTURE BEHAVIOR DUE TO A CRACK UNDER MODE III CRACK DEFORMATION BY COMPRESSIVE LOADING

Ken-ich HASHIMOTO

In this paper, first, I consider a theoretical background of the stress fields near the crack under the mode III crack deformation subjected to the compressive loading. Next, I conduct some simple experiments for the specimen with a crack under the pure mode III crack deformation by the compressive loading. As a result, I find that, near a tip of the mode III crack, a fracture crack initially occurs with the echelon cracks and the generated cracks then shift to the petal cracks. In mortal specimens, the final failure is achieved with the splitting in the many specimens and the fracture along an initial crack is confirmed in some specimens.