光弾性皮膜法による脆性材料のき裂端プロセスゾーンの 観察と非線形破壊力学*

深澤孝幸^{*1}, 橋田俊之^{*1}, 高橋秀明^{*2}

Observation of Crack Tip Strain Distribution for Brittle Materials by Means of Photoelastic Coating Technique and Non-Linear Fracture Mechanics

Takayuki FUKASAWA, Toshiyuki HASHIDA, and Hideaki TAKAHASHI

Granite, grahite and mortar are typical brittle materials. Recently, for evaluating the strength of these materials, a study based on fracture mechanics has been suggested. In general a microcrack process zone at the crack tip of brittle materials is created, which may determine the fracture process. So using the photoelastic coating method with a PLZT (transparent dielectric ceramics) plate (100-200 μm thickness), the strain field at the crack tip was directly measured. As a result, it was found that the strain field did not show the singularity of $r^{-1/2}$, (r =a distance from crack tip), as the strain field of linear elastic materials. When the strain distributions are normalized by J integral and the tensile stress σ_{III} , they were expressed by a form of $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_0 ((J/\sigma_{III})/r)^m$; thus it is found that the strain field within the process zone can be described by the J integral, where $\Delta\epsilon$ and m are material constants, and m is near 1. The strain field at the crack tip of the brittle materials is proportional to approximately r^{-1} . The extension of the process zone, denoted by ω , is closely related to the J integral. The relationship between ω and the J integral can be expressed as a bilinear line. It is shown that the J integral at the knee point is equal to the critical J integral, value determined by AE technique. Thus the J integral can be an important parameter to evaluate the fracture behavior of brittle materials.

Key Words: Fracture, Brittle Material, Process Zone, Photoelastic Coating Technique, J Integral, Crack Tip Strain Field

1. はじめに

脆性材料の典型例として岩石、黒鉛、セメント・モルタル、セラミックス、などが挙げられる。岩石は、近年盛んに研究されつつある水圧破碎による地熱エネルギー抽出用熱交換面作成の対象材料あるいは地下石油備蓄あるいは核廃棄物保管用空洞設計の対象になっている。また、黒鉛材料は高温ガス炉や核融合炉の炉心用構造部材として有用であり、セメント・モルタルは建築構造材料として広く利用されている。しかしながら、脆性材料がもつその「もろさ」のために機械的強度が問題となり、その強度を正しく評価する必要がある。このことは、構造物の設計ならびに安全性評価において特に重要な意味をもっている。

近年、脆性材料の強度評価に関して破壊力学的研究が盛んに行われている。一般に、脆性材料のき裂先端部にはマイクロクラックプロセスゾーンと呼ばれる金属の塑性域に相当する領域が形成され、これが破壊過程を決定しているものと考えられている。しかし、現在のところ、これを実験的に確かめた研究例は少なく、

いまだ不明確な点が多い。また、これまでの破壊靱性試験の結果より脆性材料のもつ変形の非線形性に起因し、線形破壊力学に基づく評価では試験片寸法効果の問題となり小形試験片から有効な破壊靱性値を得ることが困難であることが知られている。最近岩石およびコンクリートにおいて非線形破壊力学パラメータ、 J 積分を導入し、AE法を併用することにより有効な破壊靱性値が得られることが確認されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾このように脆性材料のき裂先端の破壊挙動と J 積分値とは密接な関係があると予測される。本研究ではこの点を明らかにするために、脆性材料の代表例として花こう岩、黒鉛およびモルタル材料を取り上げ、破壊靱性試験を行いひずみ場測定の一手段である光弾性皮膜法を用いてき裂端に形成されるプロセスゾーンの直接観察を実施した例を紹介する。さらに、脆性材料の破壊靱性評価パラメータとして J 積分が有効であることを検証する。

2. 実験方法

2-1 供試材ならびに光弾性皮膜法 実験に供した材料は、福島県飯館村前田産の花こう岩、高温ガス炉構造用黒鉛候補材の PGX 材および建築構造部材のモルタルの 3 種で、その構成鉱物は表 1 に示すとおり

* 昭和 63 年 3 月 12 日 東北支部第 23 期総会講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 7 月 15 日。

*¹ 学生員、東北大学大学院 (〒980 仙台市荒巻字青葉)。

*² 正員、東北大学工学部。

表 1 試料の構成鉱物

Material	Component	Young's modulus E' (GPa)	Tensile stress σ_{ult} (MPa)	Fracture toughness J_{IAE} (J/m ²)	$K_{IC} = \sqrt{E' J_{IAE}}$ (MPa m ^{1/2})
Granite	Quartz(38%), Feldspar(56%), Mica(6%)	19.4	2.6	68.0	1.15
Graphite	Coke(70%), Binder(Pitch)(30%) max. grain size of coke : 1.0mm	6.0	7.2	84.0	0.71
Mortar	Cement(42%), Sand(42%), Water(16%) age : 270 days and 320 days	40.4	3.2*	11.5	0.68

*estimated from bend test data

表 2 実験で用いた PLZT 皮膜

	Granite	Graphite		Mortar	
PLZT	B	A	B	A	B
Thickness d (μm)	190	150	190	110	190

図 2 反射形直交ニコル系の構成

である。花こう岩のき裂進展方向は異方性の弱面（リフトプレーン）に垂直なアレスタ形とした。モルタル材は打設 2 日後に脱形し、室温大気中で養生した。本実験では材令 270 日と 320 日のものを用いた。き裂端ひずみ場を測定するために光弾性効果を有する板厚および光弾性感度の異なる 2 種の透明誘電セラミックス⁽⁵⁾、 $(\text{Pb}_{0.91}\text{La}_{0.09})(\text{Zr}_{0.91}\text{La}_{0.09})(\text{Zr}_{0.64}\text{Ti}_{0.34})\text{O}_3$ （ソニー社製）ならびに $(\text{Pb}_{0.91}\text{La}_{0.09})(\text{Zr}_{0.64}\text{Ti}_{0.34})\text{O}_3$ （住友特殊金属社製）を皮膜材料として用いた（以後、PLZT-A、PLZT-B と呼ぶ）。それぞれの材料に対して用いた PLZT ならびにその板厚 d を表 2 にまとめて示す。この透明セラミックスは複屈折効果を有しており、同様な性質をもつエポキシ樹脂などに比べて微小な変形に敏感である。光学研磨を施した PLZT を加工時の残留

図 1 三点曲げ破壊靱性試験片

図 3 ばね負荷による実験装置

応力除去のため熱焼鈍（700°C, 30 min, 炉冷）した後、これにクロムを蒸着した。図 1 に示す三点曲げ破壊靱性試験片のき裂先端部にクロム蒸着面が下になるようにアロンアルファで接着した。初期き裂として、先端半径が 75 μm の切欠をカーボンブレードにより導入した。実験は、Nikon POH 形偏光顕微鏡を用い、図 2 に示す反射形直交ニコル系で測定を行った。負荷はばね負荷により行い（図 3）、荷重はそのときのばねの縮みからばね定数を用いて換算した。負荷の途中、適当な位置で中断し、PLZT に生じる光弾性縞を観察し、写真撮影を行った。さらに、それぞれの材料に対して全く同形状の試験片を用いて破壊靱性試験を実施し、各負荷段階に対応する J 積分を算出した⁽⁶⁾。なお、AE 法を用いた破壊靱性試験も同時に行った。応力拡大係数 K ならびに J 積分の算出に用いた式は次のとおりである。

$$K_I = 6YPS\sqrt{a_0}/(4BW^2) \dots\dots\dots (1)$$

$$J = fA/[B(W-a_0)] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Y, f は補正係数、 W および B は試験片幅ならびに試験片厚さ、 a_0 は初期き裂長さ、 S は支点間距離、 P は荷重、 A は荷重-荷重線変位曲線の下面積である。なお、 Y, f は有限要素法により評価した。本実験で用いた試験片は $a_0/W=0.5$ であり、 $Y=2.42$ 、 $f=2.0$ の数値を用いた。

PLZT のひずみ感度の校正は、応力分布の明確である金属四点曲げ試験片に上記と同様な手順で作製した PLZT を接着し、偏光顕微鏡により観察される各干渉色に対応する複屈折率 Δn とそのときの主ひずみ差 $\Delta \epsilon$ を求めることにより行った。ここで Δn は干渉色図表 (Michel-Levy 図表) により各干渉色に対応するリターデーション (R) から次式を用いて算出した⁽⁷⁾。

$$\Delta n = R/(2d) \dots\dots\dots (3)$$

2.2 PLZT 皮膜材料のひずみ感度の校正 四点曲げ試験の場合、中央 2 荷重点間では荷重が加わって

図 4 PLZT の校正曲線

いる面に対して曲げ応力が一様であり、板幅に対して線形こう配をもつひずみ場となる。したがって、金属の上下面におけるひずみをひずみゲージにて測定し、それを直線で結ぶことにより板幅方向のひずみ分布を得た。負荷レベルを変えて得られた各干渉色より換算される屈折率 Δn とひずみ量の関係を図 4 に示す。なお横軸は、この金属試験片のポアソン比を 0.3 として得られた主ひずみ差 $\Delta \epsilon$ で示してある。また、完全に除荷した段階では暗視野となり、用いた PLZT は光弾性効果をもたないことを確認した。図 4 の Δn と $\Delta \epsilon$ の関係は直線関係にあるものとみなすことができる。PLZT-A よりも PLZT-B のほうがいくぶん感度が良いが両者はほぼ同様の光弾性効果を有している。

3. き裂端のひずみ分布

花こう岩、黒鉛 PGX 材ならびにモルタル材の荷重-

図 5 荷重-き裂開口変位曲線

図 6 等主ひずみ差線図

き裂開口変位曲線 ($P-\delta_M$) を図 5 に同時に示す。縦軸は板厚で除してある。いずれも変形の初期より非線形挙動が観察されており、これはき裂端に形成されるマイクロクラックに起因していると考えられる。き裂端近傍に形成される光弾性縞の観察結果に基づいた等主ひずみ差線を 3 種材料について図 6 に示す。負荷段階は J 積分値にて示してある。図 6 に示したような光弾性縞を基にき裂端の各負荷段階に応じた主ひずみ差の分布を調べたのが図 7~9 である。 r はき裂端からの荷重点方向への距離である。本研究で用いたいずれの材料においても主ひずみ差分布は線形弾性体に対して成立する $r^{-1/2}$ の特異性を有しておらず、負荷の増加にともない増大する $-1/2$ 乗のこう配より緩やかなこう配のひずみ分布となっている。

4. 脆性材料の破壊靱性評価パラメータとしての J 積分の意味

図 7~9 のひずみ分布を負荷パラメータとして J 積分をとり、材料の引張破壊強度 σ_{ult} を用い規格化して図 10 にまとめて示す。ここで σ_{ult} は丸棒の引張試験で評価された破壊応力である。なお、モルタルについては花こう岩と黒鉛の引張強度と曲げ強度の対応関係より曲げ強度を用いて換算した値を用いた。

これよりわかるように、脆性材料のき裂端ひずみ分布は、 $r/(J/\sigma_{ult})$ によりよく整理される。また、異なる感度ならびに板厚の PLZT を用いた影響は黒鉛材料においてはほとんどみられず再現性のある結果が得られた。このことを考慮すると、モルタルにおける差異は材令日数の差に起因していると思われる。

さらに、線形破壊力学パラメータ K を用い、 $r/(K_I/$

図 7 花こう岩のき裂先端主ひずみ差分布 (PLZT-B)

図 8 黒鉛のき裂先端主ひずみ差分布 (PLZT-B)

図 9 モルタルのき裂先端主ひずみ差分布 (PLZT-B)

図 10 J 積分によるき裂先端主ひずみ差分布の規格化

図 11 K によるき裂先端主ひずみ差分布の規格化

σ_{ult})²にて規格化したモルタルおよび黒鉛についてのひずみ分布を図11に示す。図11から K_I 値による評価では低い負荷段階においては、ほぼ同一の曲線にあるが負荷とともに右へ移動し、統一的な評価が困難であることがわかる。これは、き裂端に形成されるマイクロクラックプロセスゾーンの大きさが、負荷初期段階においては試験片寸法に比べ無視できるが、負荷とともに増大していき K 支配領域を越えてしまったためと考えられる。

さらに図12に $\Delta\epsilon$ と $(J/\sigma_{ult})/r$ の関係を示す。両者は高ひずみ域 (1700 $\mu\epsilon$ 以上) を除いてほぼ直線関係とみなすことができる。ここで、延性金属材料のき裂端ひずみ場にならって⁽⁸⁾、それと対応する脆性材料のプロセスゾーン内のひずみ場を次式のようにおくことにする。

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_0 [(J/\sigma_{ult})/r]^m \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\Delta\epsilon_0$, m は定数である。図10を各材料に対して式(4)の形で表すと、 m は1に近く、すなわち r^{-1} に近い特異性をもつことがわかる。このことは剛塑性体のき裂端ではひずみ分布が r^{-1} の特異性をもつこと

に類似している⁽⁹⁾。ここで $m=1.0$ とみなすと、 $\Delta\epsilon_0$ のみが材料に依存する定数である。

さらに、図7~9からある主ひずみ差に対応するき裂端からの距離を ω と定義し、 J 積分値との関係を図13にまとめて示す。いずれの材料においても両者の関係は2直線で近似することができる。この折れ曲がり点での J 積分値を J_{wc} とし、AE法を用いた破壊靱性試験により得られた J_{IAE} 値との関係を図14に示す。このように両者の値はほぼ一致しており、 J_{wc} 値も巨視き裂進展開始段階に対応していると考えられ、この J_{wc} 値は J_{IAE} と同様材料固有値となり得よう。すなわち、図6に示したモルタルおよび黒鉛に関するひずみ分布はこの材料固有の限界ひずみ分布となる。実際、この負荷段階において、計測中にひずみ場が増大し、巨視き裂進展により破断に至るのが観察された。低負荷段階における ω と J 積分値はほぼ比例関係にあることがわかる。この領域はマイクロクラック形成域つまりプロセスゾーンに相当し、 J 積分の増加とよく対応している。このように脆性材料の破壊靱性評価においても従来延性材料で用いられてきた J 積分に基づく評価が有効であることがわかる。

また、AE法を用いて巨視き裂進展開始時の J 積分値すなわち J_{IAE} 値と有効縦弾性係数 E' を用いて

$$K_{IC} = \sqrt{E' J_{IAE}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

により破壊靱性値 K_{IC} を計算することができる⁽²⁾。この J 積分に基づいて求められた K_{IC} 値は、き裂端のプロセスゾーンの大きさが試験片寸法に比べ無視できない大規模マイクロクラッキング状態においても試験片寸法効果のない材料固有値となることが本研究で用いた花こう岩やコンクリート材料についてすでに求められている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。また、前述のように $J_{IAE} \approx J_{wc}$ である

図12 $\Delta\epsilon$ と $(J/\sigma_{ult})/r$ の関係

図13 高ひずみ域の大きさ ω と J 積分の関係

図14 J_{wc} 値と J_{IAE} 値との関係

ことから岩石で得られる平面ひずみ破壊靱性値 K_{Ic} は予き裂先端のマイクロクラックプロセスゾーン寸法がある限界値に達して主き裂として進展を開始する条件を与えることになる。

5. 結 論

脆性材料の典型例である花こう岩、黒鉛、モルタルを用いて透明セラミックス光弾性皮膜法によりき裂端ひずみ場を観察した結果、以下の知見を得た。

(1) 脆性材料のき裂端の主ひずみ差分布は、線形弾性体に対して成立する $r^{-1/2}$ の特異性を有しておらず、 r^{-1} の特異性に近い緩やかなひずみこう配となっている。

(2) 脆性材料のき裂端ひずみ場は J 積分によりよく記述できる。

(3) 限界マイクロクラック域寸法に達したときの J 積分値、 J_{wc} は巨視き裂進展開始時の J 積分、 J_{IAE} 値にほぼ一致しており材料固有値となり得る。

透明セラミックスの入手にあたりご協力をいただい

たソニー株式会社の村野寛治氏ならびに住友特殊金属株式会社の豊田 幸夫氏に厚く感謝の意を表します。

さらに本研究を実施するにあたり多大なるご指導を賜りました東北大学工学部電気工学科 新妻弘明助教授に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 高橋・ほか 4 名, 日本鉱業会誌, 100 (昭 59), 17.
- (2) 橋田・高橋, 第 6 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, (昭 59), 13.
- (3) Hashida, T., ほか 2 名, *Proc. SEM-RILEM Int. Conf. on Fracture of Concrete and Rock*, Houston, Texas, June (1987), 389.
- (4) Hashida, T., ほか 3 名, *Proc. SEM-RILEM Int. Conf. on Fracture of Concrete and Rock*, Houston, Texas, June (1987), 397.
- (5) 新妻・ほか 2 名, 電気学会誌, 53-A 20 (昭 53), 151.
- (6) American National Standard, ANSI/ASTM E 813-81 (1981).
- (7) 坪井, 偏光顕微鏡, (昭 34), 岩波書店.
- (8) Shoji, T., *Met. Sci.*, 10 (1976), 165-169.
- (9) 白鳥・ほか 2 名, 数値破壊力学, (昭 55), 87, 実教出版.

討 論

〔質問〕 松尾 陽太郎〔東京工業大学〕

透明誘電セラミックスを用いた光弾性皮膜法により、従来困難とされていた脆性材料のプロセスゾーンを観察し、種々の貴重な結果を示されたことに敬意を表す。なお、下記の点について質問する。

(1) 脆性材料の引張破壊強度は一般に変動することが知られている。貴実験では、その変動係数はいかほどか。

(2) プロセスゾーン内のマイクロクラックを TEM 等で直接観察されたか。また、プロセスゾーン寸法の限界値は、なにによって決まるのか。

〔回答〕 (1) 本実験の引張試験に用いた供試体の個数は岩石、モルタル、黒鉛について、各々 4, 6, 16 個であり、変動係数はそれぞれ 7, 12, 11% である。

(2) 岩石については薄片の偏光顕微鏡観察によりマイクロクラックの形成過程を調べている〔文献(1)参照〕。プロセスゾーン寸法の限界値に関しては、領域内に形成されるマイクロクラックの限界密度により決定されるものと予想している。具体的な検討を今後進めたいと考えている。

〔質問〕 西 松 裕 一〔東京大学工学部〕

著者自身ものべているように、また図 13 を見ても、 J_{wc} を決定する実験では (graphite を除いて)、巨視的

き裂進展開始とほぼ同時に、最終破断を起こしているように思われる。

もしそうであれば、岩石、モルタルについて得られた J_{wc} は、 R 曲線法によって求めた J_{in} と一致するのであろうか。

また、黒鉛は他の二者と多少異なった挙動を示しているようであるが、この相異はなにに由来するものなのか。

〔回答〕 本実験では、コンプライアンスの大きい (26 N/mm) ばねにより試験片を負荷しているため、荷重制御に近い負荷条件となっている。さらに、本実験で用いた比較的小形の岩石、モルタル試験片においては巨視的き裂進展がほぼ最大荷重点で開始するため〔文献(2)参照〕、き裂進展開始と最終破断がほぼ同時に起こる。これに対して、黒鉛では最大荷重時以前に巨視的き裂が進展を開始したものと考えることができる。すなわち、図 13 に観察される巨視的き裂進展後の相違は、材料間のき裂進展抵抗の大きさの差違によるものと推察される。

J_{wc} と R 曲線法による J_{in} との対応に関しては、き裂進展量の測定手法に依存すると思われるが、基本的には J_{wc} は合理的に評価された R 曲線から求めた J_{in} と一致するものとする。