

圧縮混合モード荷重下におけるぜい性材料のき裂進展挙動[†]阿部 孝 弘* 矢 富 盟 祥**
鱸 洋 一*** 辻 野 和 彦****Crack Extension Behavior in the Brittle Material
under Compression Mixed Mode Loadings

by

Takahiro ABE*, Chikayoshi YATOMI**,
Yoichi SUZUKI*** and Kazuhiko TSUJINO****

The purpose of this paper is to examine the crack extension behavior in the brittle material under the compression mixed mode loadings. We here employ a cement paste as the brittle materials. An initial crack was inserted in the center of the disc-type test-piece. The compressive loads were obliquely applied to the initial crack. The extension phenomena of the crack were photographed by a high-speed video camera, and the image analysis was carried out. Using the result of the image analysis, we observed the crack extension behavior in the experiment in detail. It was confirmed that the cracks first occurred from the tips of the initial crack and the secondary cracks were observed after the first cracks. The experimental results were examined using the energy release rate criterion. As a result, the relations between the fracture load in the experiment and the loading angle were found to agree well with the relations between the energy release rate by the E-integral and the loading angle.

Key words : Crack extension, Mixed mode loading, Image analysis, Energy release rate, E-integral, FEM

1 緒 言

土木構造物の主材料であるコンクリートあるいは岩石などは、ぜい性的な破壊を生じ、その強度を推定することは工学的に重要な問題である。これらの材料は力学的性質の異なる物質が結合して構成されている非均質な材料であり、その内部は潜在き裂の存在や構成物質相互の界面の影響などにより、多数のき裂が干渉し合う非常に複雑な状況となっている。そのため、従来の材料力学的な手法では、対処できなくなり、破壊力学的手法を用いるアプローチが有効と考えられ、多くの研究が精力的に成されている。Griffith^{1), 2)}の破壊理論に始まったき裂進展の力学である破壊力学は、Irwin³⁾によって提唱された応力拡大係数 K 値による破壊じん性値の概念へと発展し、今日ではすでに金属などを主とする工業材料の材料特性の1つとして設計等に用いられている。しかし、これらの金属材料では進展き裂が引張荷重により開口している場合を対象としたものがほとんどである。それに対して岩石、コンクリートなどが構造物に使用される場合には、引張強度が小さいという材料の性質上、ほとんどが圧縮荷重作用下で用いられる。したがって、圧縮荷重下での強度が問題であり、その圧縮破壊過程のメカニズムは引張破壊過程に比べて非常に複雑であることが知られている。圧縮荷重下では多くの場合、き裂は閉じて接

触し、荷重状態によっては摩擦力に保持されながら滑り、モードI型(開き型)とモードII型(せん断型)の混合モード状態で折れ曲がって進展する。き裂折れ曲がりの進展挙動を把握するためには、破壊パラメーターとして応力拡大係数よりもエネルギー解放率を用いた方が、モードI、モードIIを区別する必要がなく、有利である場合が多い。矢富ら⁴⁾によれば、混合モード下におけるエネルギー解放率を求める場合にも、E積分⁵⁾が有効であることが報告されている。

そこで、本研究では混合モード下におけるき裂進展挙動の状況を把握することを目的とし、まず、セメントペーストで作成した円盤型供試体中に、その直径方向にき裂を挿入し、き裂面方向から傾斜させた荷重方向で圧縮実験を行った。その際、き裂の進展状況を高速度ビデオカメラで撮影し、その映像を基に画像解析を行ない、き裂進展挙動を観察した。そして、き裂進展挙動がエネルギー解放率による破壊規準に従うものとして、E積分による解析結果と実験結果との比較検討を行った。

2 実 験

2・1 実験方法

実験には、水セメント比を40%とした、直径10cm、厚さ3cmのセメントペーストによる円盤型供試体を作成し、セメントペースト打ち込み時に、この供試体中央に、

† 原稿受理 平成13年7月6日 Received July 6, 2001

* 正 会 員 福井工業高等専門学校環境都市工学科 〒916-8507 鯖江市下司町, Dept. of Civil Eng., Fukui National College of Tech., Geshi-cho, Sabae, 916-8507

** 正 会 員 金沢大学工学部土木建設工学科 〒920-8667 金沢市小立野, Dept. of Civil Eng., Kanazawa Univ., Kodatsuno, Kanazawa, 920-8667

*** 五大開発(株)応用工学研究所 〒921-8051 金沢市黒田, Applied Mechanics Inst., GODAI Development Corp., Kuroda, Kanazawa, 921-8051

**** 福井工業高等専門学校環境都市工学科 〒916-8507 鯖江市下司町, Dept. of Civil Eng., Fukui National College of Tech., Geshi-cho, Sabae, 916-8507

PET (使用済み NTT テレホンカード: 平均厚さ 0.275 mm) の先端を紙やすりで加工し, 切り欠き状にしたものを埋め込み, 脱型時に抜き取り初期き裂とした. 初期き裂の長さは, 2cm, 3cm の 2 種類とした. 養生期間はすべて 4 週間とし, 20°C 水中養生とした.

Fig. 1 に示すように, この供試体に, き裂面方向に対して β の載荷角度で圧縮荷重 P を作用させ破壊に至るまで負荷実験を行い, 最大荷重値を測定した. 載荷角度 β は 0° から 70° まで 5° ごととした. 試験機はインストロン社製 5581 型万能試験機を用い, スキャン間隔は 1 秒であり, 載荷速度 0.05mm/min の変位制御で載荷した.

2・2 実験後の供試体の状況

実験後の供試体の破壊状況を模式的に描くと Fig. 1 のようであった. β が $5^\circ \sim 70^\circ$ で破壊した供試体では, 初期き裂先端と載荷点を結ぶ滑らかな曲線を描きき裂と, 載荷点からわずかにずれた位置と初期き裂先端をかなり湾曲して結びき裂を生じた. ここで前者のき裂を 1 次き裂, 後者を 2 次き裂と呼ぶことにする. 1 次き裂の破壊面の状況は滑らかで刃物で切ったようにきれいに割れていたが, 2 次き裂の破壊面は不規則に割れていて, どれも凹凸が見られた. また, 1 次き裂は 1 本のみであったが, 2 次き裂は複数生じている供試体も多く見られ, 載荷角度によって湾曲の仕方がかなり変化していた. このような実験結果の報告はこれまでも多く成されている.⁶⁾

実験後の破壊状況および実験条件から, まず最初に初期き裂先端から載荷点に向かって 1 次き裂が発生し, 供試体が 1 次き裂によって分割された後に, 載荷点近傍から初期き裂先端に向かって 2 次き裂が発生することが予想されるが, 破壊が載荷速度を遅くしても一瞬で生じてしまうため, 目視あるいは通常のビデオカメラによる観

察では判別不可能である.

そこで, 高速度ビデオカメラ (Kodak EKTAPRO Hi-Spec Motion Analyzer) を用いて, き裂の進展する瞬間時を撮影し, その映像を画像解析することにより, 初期き裂先端から 1 次き裂が先に発生し, その後載荷面近傍より 2 次き裂が発生していることを確認した. これについての詳細は第 3 章にて後述する.

このように高速ビデオ映像により初期き裂先端より 1 次き裂が最初に進展することが明らかとなったことにより, Fig. 1 に示すように, 初期き裂先端から 1 次き裂が進展する瞬間の角度 θ を供試体表面上で測定した.

3 き裂進展の画像解析

3・1 データ処理の手順

撮影に使用した高速度ビデオカメラの, 画像レートは最高 6000 フレーム/秒, 有効画素数は 232×192 ピクセル, スペクトル感度は 400 ~ 1000nm である. 有効画素数が 232×192 ピクセルであることから, 撮影可能な領域が限定されるため, 撮影範囲は初期き裂から載荷点までの長方形とし, 4000 フレーム/秒で撮影した. この映像を MPEG 形式の動画として取り込み, 1 フレーム/秒としたアニメーション GIF として出力する. この GIF 形式の画像から, き裂発生前後の連続した 10 フレーム程度の画像を個々の画像に分解し, 1 フレームごとの画像を得る. 以上の一連の操作を行なうことによって, 初期き裂が進展する瞬間前後の 1/4000 秒間隔の画像 (原画像) を得たことになる. Fig. 2 にこのようにして取り出した原画像の一例を示す.

1 フレームごとの原画像に, 4 階調化処理, エッジ抽出処理, 差画像処理をそれぞれ実施し, 処理をした画像から破壊時におけるき裂の進展状況を観測した. 画像処理方法の概略を以下に示す.

3・1・1 4 階調化処理 画像にはピクセルごとに 0 ~ 255 までの 256 階調の輝度値 (以下, Digital Number: DN と略記する.) がある. 対象とする原画像は, 簡単に分けるとコンクリートとき裂の二種類の DN に分類できることが予測される. したがって, き裂部分の DN が決定できれば, 二値化処理によって, き裂部分を抽出することができる. しかし, 原原画像の DN のヒストグラム

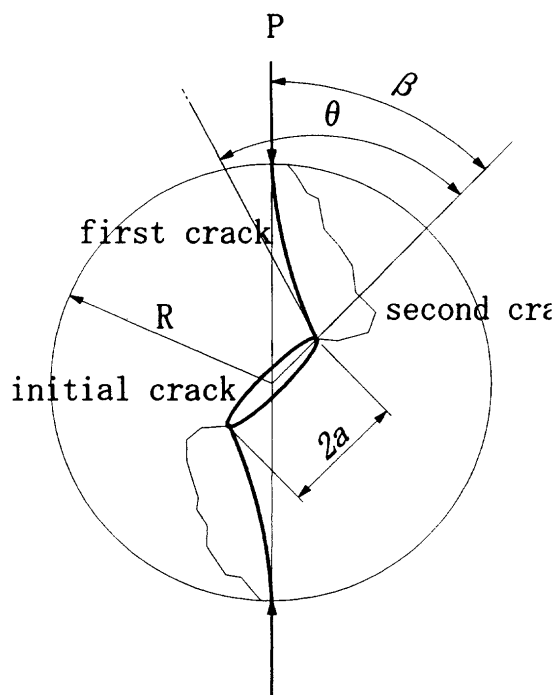


Fig. 1. The test-piece with an initial crack and the pattern of crack extension after the experiment.

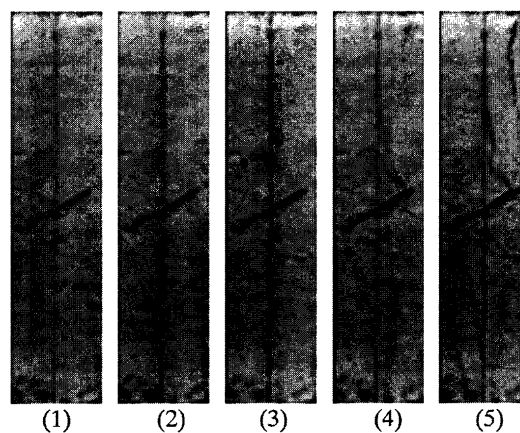


Fig. 2. Original images.

を確認したところ、照明むら、供試体表面の色むらなどの要因によって、それぞれの DN が画像全体で一定していないことがわかった。そこで、き裂部分の DN を目視により判断し、3つの任意のしきい値を設定した。データにより画像全体の明暗の差が大きいため、3つの任意のしきい値は一定にすることはできなかった。このような手法によって得られた4階調化画像を Fig. 3 に示す。

3・1・2 エッジ抽出処理 DN の特徴が似ている部分を1つの領域とすると、それらの境界では DN が急激に変化している。この境界をエッジというが、き裂部分では DN が急激に変化していることが予想される。したがって、エッジを抽出することによってき裂部分を取り出すことができると考えられる。エッジ抽出画像では、4階調化画像よりも急激に DN の変化があるものを抽出していることになる。エッジ抽出には、グラディエント処理とラプラシアン処理が代表的であるが、グラディエントでは座標 (x, y) における DN の勾配を表す値を大きさや方向を持つベクトル量として表現され、ラプラシアンでは、輪郭の強さだけを抽出する。Fig. 4 にラプラシアン処理をしたエッジ抽出処理画像を示す。

3・1・3 差画像 原画像は、き裂進展瞬間前後の 1/4000 秒間隔の画像であり、これらの画像のサイズは全て等しい。したがって、それぞれの画像の、DN の差を

とった差画像が得られる。差画像には規準となる画像と比較する画像の異なる部分が抽出される。2つの画像でき裂が進展している部分だけが抽出されることになる。Fig. 5 に Fig. 2 (a) である原画像の1枚目を規準画像とした差画像 I を、Fig. 6 に1つ前の原画像を規準画像とした差画像 II を示す。

3・2 画像解析の結果と考察

原画像 Fig. 2 では、き裂の進展は 4, 5 コマ目に現れているものの、画像全体のコントラストが低く、色のばらつきがあるためにき裂幅が小さい 3 コマ目では、はっきりとき裂を把握できない。4 階調化画像 Fig. 3 ではしきい値を3つ指定しているため、目標とするき裂以外のものも抽出されている。これは、き裂部分に類似した DN の部分の影響が出ていると考えられる。4, 5 コマ目では初期き裂から生じている 1 次き裂と、その次に発生している 2 次き裂が抽出できている。しかし、き裂は断片的に抽出されている。これは、設定したしきい値と実際の DN が適合していなかったことによると考えられる。画像によりき裂部分の濃度が濃くなっているが、これはき裂幅が広がっていることを示し、このことより、き裂はその進展と同時に広がっていることが確認できる。エッジ抽出画像 Fig. 4 では、4 階調化画像よりも急激に DN の変化があるものを抽出している。き裂は連続的に抽出されており、4 階調化画像では抽出されていない部

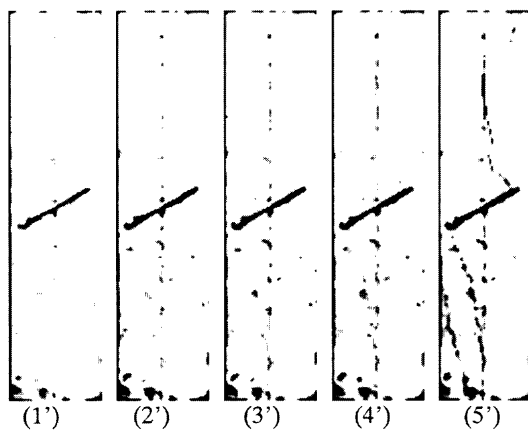


Fig. 3. Slice images with the 4stair-stepped level.

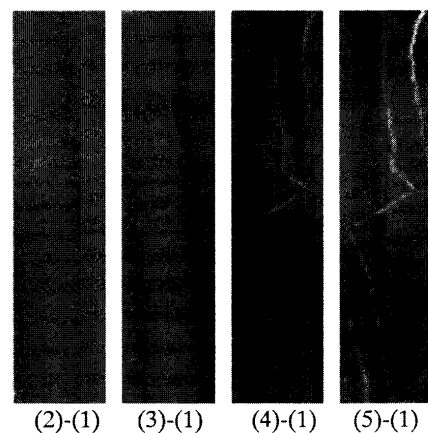


Fig. 5. Difference images I.

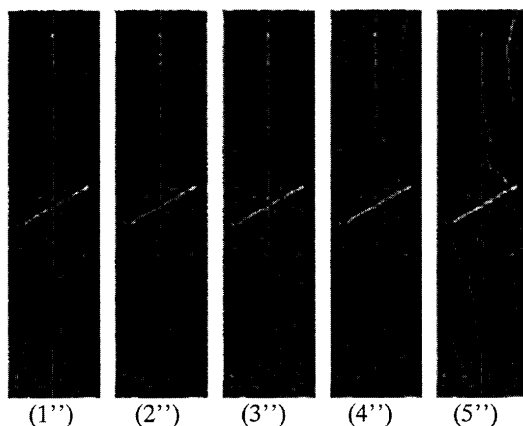


Fig. 4. Edge enhancement images.

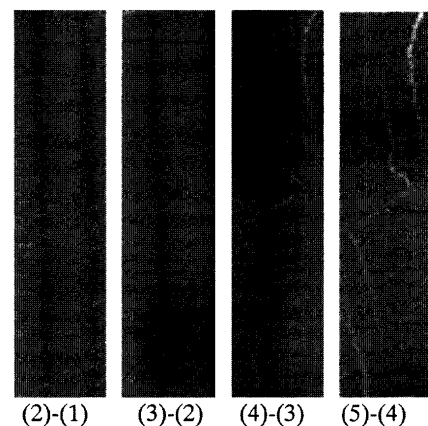


Fig. 6. Difference images II.

分も抽出されている。また、表面に現れているき裂以外で抽出されている部分は、供試体表面の微細な凹凸具合によりき裂以外のものもエッジとして抽出されている。き裂は、4階調化画像と同様に初期き裂から伸びている1次き裂と、その後発生する2次き裂が抽出されている。4階調化画像、エッジ処理画像とともに原画像から得られる情報以上のものが得られているとはいいがたい。

これらに対して、差画像 Fig. 5(3)～(1)および Fig. 6(3)～(2)からは3コマ目に1次き裂が発生し、4コマ目に2次き裂が発生していることが明瞭に確認できる。き裂幅の大きさの差が大きければ差画像にはっきりと抽出できている。Fig. 5の方が基準をすべて1コマ目にとっているため差が大きくはっきりと現れている。差画像を見ることによって、き裂の進展状況を明瞭に確認することが可能であることが明らかとなった。しかし、差画像はき裂が進展していなければ、き裂部分を抽出することはできない。進展がないき裂の状況を把握するためには、しきい値処理、エッジ処理を組み合わせた解析手法を試みる必要がある。

4 エネルギー解放率を求めるためのE積分公式

前章で明らかのように、最初に初期き裂先端から1次き裂が折れ曲がり進展することが確認できた。そこで、初期き裂先端が折れ曲がり進展する瞬間時のエネルギー解放率を求めることにする。矢富ら⁴⁾は圧縮荷重が作用し、き裂面に摩擦および滑りを伴う混合モード下のき裂進展においては、き裂面上の積分を考慮した補ひずみエネルギー型E積分を用いれば、進展き裂先端のエネルギー解放率を精度よく求められること報告している。なお、周知のJ積分では、き裂が直進する瞬間時のエネルギー解放率は求めることが出来るが、折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率は求める事が困難であることに注意する。⁷⁾

線形超弾性体の場合で、変形が微小の場合に限定された場合では、外荷重が比例荷重で与えられると、補ひずみエネルギー型E積分公式は、次式で与えられる。⁵⁾

$$E(l) = \frac{\partial}{\partial l} \left\{ \int_{\Gamma \cap C^{\pm}} \left(\frac{1}{2} \mathbf{s} \cdot \mathbf{u} \right) ds \right. \\ \left. - \int_{\Gamma \cap C^{\pm}} \left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial l} \cdot \mathbf{u} \right) ds \right\} \quad (1)$$

ここで、 l はき裂長さであり、 $\partial/\partial l$ は右微分係数である。すなわち、き裂が折れ曲がった状態で微分 $\partial/\partial l$ を行い、その後、き裂折れ曲がり部分の長さ0に収束させた微分係数である。 C^{\pm} はき裂上下面の境界であり、 Γ はき裂面を除いた領域の境界である。き裂面上で摩擦力がありき裂面上での積分が0とはならないため積分経路はき裂面上下 C^{\pm} と任意の経路 Γ の両方を含んだ $\Gamma \cap C^{\pm}$ となる。 \mathbf{s} は Γ と C^{\pm} 上の公称表面力であり、 \mathbf{u} は変位である。

E積分の値は、有限要素解析において基準状態の、き裂長さ l のモデル（以後、基本モデルと呼ぶ）と、き裂長さが直進ないし折れ曲がり Δl 伸びたモデル（以後、き裂進展モデルと呼ぶ）の2つのモデルについて解析を行い、き裂長さ l による偏微分項は2点差分近似することにより、また経路積分は、表面力と変位をそれぞれ離散

化した等価節点表面力 \mathbf{s}_i と節点変位 \mathbf{u}_i を、積分経路上の全節点で和をとることにより求める。すなわち、式(1)の数値解析には、次式を用いた。

$$E = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\mathbf{s}_i(l+\Delta l) \cdot \mathbf{u}_i(l+\Delta l) - \mathbf{s}_i(l) \cdot \mathbf{u}_i(l)}{2\Delta l} \right. \\ \left. - \frac{\mathbf{s}_i(l+\Delta l) - \mathbf{s}_i(l)}{\Delta l} \cdot \mathbf{u}_i(l) \right\} \quad (2)$$

ここで n は積分経路上の節点の数であり、 Δl は基本モデルとき裂進展モデルのき裂長さの差である。また式(2)中の変数の l および $l+\Delta l$ は、それぞれ基本モデル、き裂進展モデルの物理量であることを表している。

進展き裂面上の状態は圧縮応力の大きさやその载荷履歴などにより、さまざまな状態が考えられるが、ここではその状態を、固着接触状態、滑り接触状態、開き状態の3つに大きくわけて考える。ただし、滑り接触状態のとき、滑り方向とは逆向きに摩擦力が発生するが、摩擦力はCoulombの摩擦法則に従うものとし、そのときの摩擦係数 μ は定数とする。

ここに、固着接触状態とは、進展き裂面上での法線方向表面力成分が圧縮状態にあり、かつ接線方向表面力成分が限界摩擦力以下のときである。滑り接触状態とは、外力の負荷により進展き裂面上での接線方向表面力成分が限界摩擦力以上になったときであり、開き状態とは、負荷後の変形によっても接触しない状態をいい、負荷前に接触していた点の法線方向表面力成分が引張になる条件となるような状態である。⁴⁾

5 結果と考察

5・1 最大荷重値と载荷角度との関係

Figs. 7, 8にそれぞれの初期き裂長さにおける、最大荷重値と载荷角度 β の関係を示す。本来ならば、き裂が進展する瞬間時の荷重値を破壊荷重値として議論すべきであるが、荷重の測定間隔は1秒であるのに対して、前述のようにき裂進展速度は1/4000秒以下であり、厳

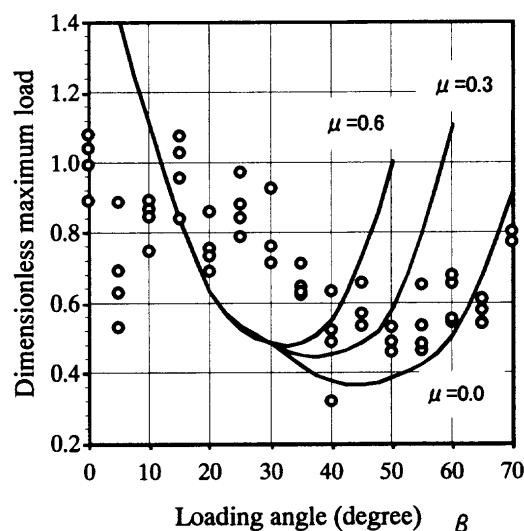


Fig. 7. Relationship between maximum load and the loading angle ; $2a = 2\text{cm}$ ($2a/2R = 0.2$).

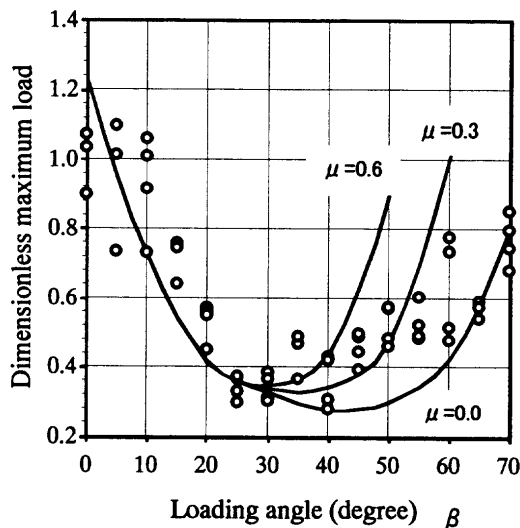


Fig. 8. Relationship between maximum load and the loading angle ; $2a = 3\text{cm}$ ($2a/2R = 0.3$).

密な破壊荷重値の測定が困難である。そのため、測定における最大荷重値が破壊荷重値に相当するものと仮定して考察する。Figs. 7, 8において、縦軸の最大荷重値は各載荷角度における最大荷重値を、載荷角度 0° における最大荷重値の平均で除して無次元化し、弾性体の場合、エネルギー解放率とき裂進展時の荷重値の2乗が比例することから、無次元化した値を2乗してある。図中に示した曲線については後述する。

Fig. 7より初期き裂長さが短い場合には、初期き裂を供試体中央に挿入することの困難さ、荷重値の変化が小さいことなどによって実験値のばらつきが大きい。載荷角度が 0° から大きくなるに従い最大荷重値は減少し、載荷角度がある値を超えると再び増大する傾向があることがわかる。初期き裂長さが大きい 3cm の場合では、この傾向がより明確になり、最大荷重値が載荷角度に対して極小値を持つことが確認できる。

載荷角度が 0° の場合には完全なモードIの状態であり、初期き裂は直進進展する。載荷角度が大きくなると、き裂面内にせん断力が生じ、モードIとモードIIの混合モード下となり、初期き裂先端は折れ曲がり進展する。載荷角度が小さい場合は、き裂面は開いているが、載荷角度がさらに大きくなると、き裂面が閉じ摩擦が生じ初期き裂先端が進展しにくくなり、最大荷重値が再び増加すると考えられる。

Fig. 9にき裂長さと直径の比 $2a/2R = 0.2$ 、Fig. 10に $2a/2R = 0.3$ におけるエネルギー解放率の解析結果を示す。き裂面における摩擦係数 μ は 0.0 、 0.3 および 0.6 とした。ここに縦軸は、載荷角度を一定とし、折れ曲がり角度を変えてE積分によりエネルギー解放率を解析した結果から、エネルギー解放率が最大となったき裂折れ曲がり角度における解析結果を取り出し、その値を無限板内にある長さ $2a$ のき裂に、一様応力 $P/(R\pi)$ が載荷された場合の理論解⁸⁾で除して無次元化した値である。

Figs. 9, 10から、載荷角度が約 30° までは、き裂面における摩擦係数の大きさにはあまり影響なく、載荷角度

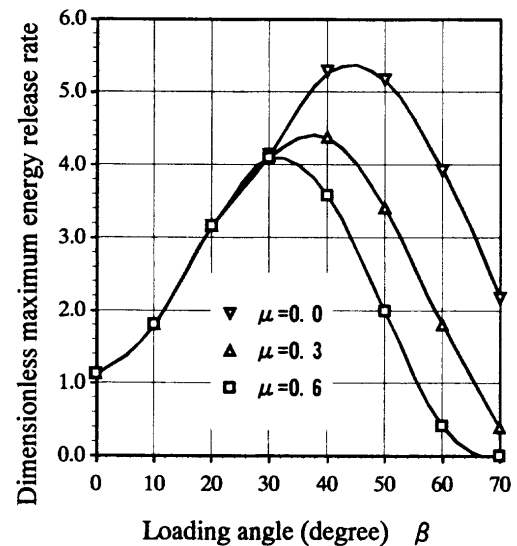


Fig. 9. Relationship between the energy release rate and the loading angle ; $2a/2R = 0.2$.

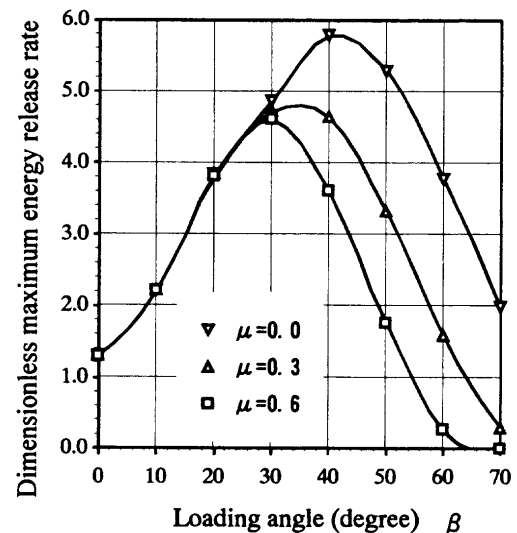


Fig. 10. Relationship between the energy release rate and the loading angle ; $2a/2R = 0.3$.

が大きくなるとともにエネルギー解放率は増大している。載荷角度が 30° を越えると、摩擦係数 $\mu = 0.0$ の場合にはさらに増大し、 $40 \sim 50^\circ$ で最大となるが、摩擦がある場合には摩擦係数が大きいほどエネルギー解放率は小さくなり、 $\mu = 0.3$ では $30 \sim 40^\circ$ で、 $\mu = 0.6$ ではほぼ 30° で最大となる。以上のことを換言すれば、エネルギー解放率は載荷角度に対して極大値を持ち、その極大値は、摩擦係数が小さいほど、大きな値であり載荷角度が大きいつきに生じていることになる。

き裂の進展がエネルギー解放率破壊規準によるものとするれば、エネルギー解放率が最大となるき裂先端が、エネルギー解放率が最大となる方向に進展する。したがって、エネルギー解放率が大きくなると、き裂が進展しやすくなり、混合モード下における破壊荷重は小さくなり、逆にエネルギー解放率が小さければ、き裂は進展しにくくなり、破壊荷重は大きくなると考えられる。この理由で、Figs. 7, 8で載荷角度に対して最大荷重が極小値を持つことと、

Figs. 9, 10 でエネルギー解放率が極大値を持つことは対応づけられ、混合モード下のき裂進展を破壊力学的に説明することができる。

Figs. 7, 8 の極小値の位置と、Figs. 9, 10 の極大値の位置を比較すると、 $2a = 2\text{cm}$ では $\mu = 0.0$ の場合で $\beta \approx 50^\circ$ 、 $2a = 3\text{cm}$ では $\mu = 0.6$ の場合で $\beta \approx 30^\circ$ で両者が比較的よく一致している。これは、初期き裂は、その作成上最初約 0.275mm の幅を持っており、圧縮荷重がかかってもき裂長さが短い時には β が $40 \sim 50^\circ$ になってもき裂が完全に閉じなかった可能性があり、き裂が長い場合には β が 30° 前後で閉じ摩擦効果が大きく生じたと考えられる。

さて、ここで破壊荷重値とエネルギー解放率の関係を理論的に検討すれば、次のことが言える。実験において、供試体寸法およびき裂長さが一定であれば、エネルギー解放率は、荷重値 P と載荷角度 β の関数と考えることができる。ここで、線形弾性体に集中荷重 P が作用する場合、エネルギー解放率は P の 2 乗に比例する。したがって、載荷角度 β のとき、エネルギー解放率 G は、

$$G = G(P, \beta) = P^2 f(\beta) \quad (3)$$

と表すことができる。ここに、 $f(\beta)$ は載荷角度がエネルギー解放率に寄与する成分を表す関数である。したがって、載荷角度 0° のときのエネルギー解放率は

$$G_0 = G(P, 0) = P^2 f(0) \quad (4)$$

となる。破壊荷重 P_c で、き裂が進展したときのエネルギー解放率は、

$$G_c = G(P_c, \beta) = P_c^2 f(\beta) \quad (5)$$

となる。ここで、式 (3) と式 (4) の比は次式で示されるように β の関数となる。それを $G(\beta)$ とおけば、

$$G(\beta) = G/G_0 = f(\beta)/f(0) \quad (6)$$

となる。ここに、 $G(\beta)$ は Fig. 9 および Fig. 10 で示されるエネルギー解放率から求めることができる。式 (5) および式 (6) から

$$P_c^2 = G_c / f(\beta) = G_c / (G(\beta) f(0)) \quad (7)$$

となり、破壊荷重が載荷角度で異なることになる。 $f(0)$ は一定であるから、材料の破壊靱性値 G_c が一定であるとすれば、

$$P_c^2 = C / G(\beta) \quad (8)$$

の関係が得られる。ここに C は定数である。

このように、エネルギー解放率に極大値が存在すれば、破壊荷重に極小値が存在することが線形弾性体では理由付けられる。ここに定数 C は、実験条件が変われば異なる値となる。Fig. 7 および Fig. 8 に示してある曲線は、Fig. 9 および Fig. 10 におけるエネルギー解放率を $G(\beta)$ とし、 C を極値が実験結果に合うように取った $C/G(\beta)$ である。

実験結果のばらつきの少ない Fig. 8 で実験値と曲線を比較すると摩擦の影響がない載荷角度 β が 30° までは両者はよく一致し、 β が 40° 以降では、載荷角度に対する実験値と解析値の傾向は一致しており、混合モード荷重

下におけるき裂進展挙動をエネルギー解放率による破壊規準で検討することが妥当であることがわかる。

ただし、 β が 40° 以降では、実験値は摩擦係数が小さい曲線と一致している。載荷角度が大きくなれば、き裂面における摩擦が大きくなりき裂は進展し難くなり、破壊荷重が大きくなるものと考えられ、Fig. 8 とは矛盾する。この理由としては、実験条件と解析条件との違いが考えられる。解析では初期き裂は完全に閉じた状態としているが、実験では PET を挿入して初期き裂を作成したため、その先端が閉じておらず、載荷角度が大きい場合にはき裂が折れ曲がって進展することから、この影響が実験値に及ぼされたこと、次に、解析では線形弾性体と仮定しているが、セメントペーストは完全な線形弾性体とはみなされないこと、また、破壊荷重値として測定した最大荷重値としたことなどが挙げられる。実験方法および解析方法の改善を試み、き裂面における摩擦の影響を明らかにすることは今後の課題としたい。

5・2 き裂折れ曲がり角度と載荷角度との関係

次に、初期き裂先端のき裂折れ曲がり角度 θ の測定値と E 積分による解析結果からエネルギー解放率が最大となった方向の比較を $2a = 2\text{cm}$ ($2a/2R = 0.2$) について Fig. 11 に、 $2a = 3\text{cm}$ ($2a/2R = 0.3$) について Fig. 12 に示す。解析結果の 3 本の曲線は、き裂面における摩擦係数の違いによるものである。解析結果より、き裂折れ曲がり角度は載荷角度が大きくなると共に増大し、載荷角度が 30° を過ぎるとほぼ 70° の一定の値となり、き裂面における摩擦が大きい場合には載荷角度が 60° を越えるときき裂折れ曲がり角度は小さくなることわかる。

供試体におけるき裂折れ曲がり角度の測定は、破壊後の供試体における表裏の 4 つの初期き裂先端をマイクロスコープ (キーエンス VH-7000) を用いて 25 倍に拡大した画像上で行ない、その平均値を取った。供試体表面での測定であるためバラツキはかなりある。 $2a = 2\text{cm}$ 、 $2a = 3\text{cm}$ とともに載荷角度が 40° までは解析結果より小さい値であり、それ以上では解析結果をまたいで分布して

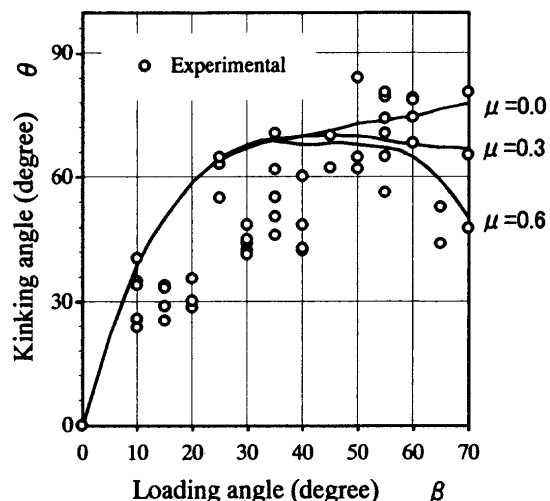


Fig. 11. Relationship between the kinking angle and the loading angle: $2a = 2\text{cm}$.

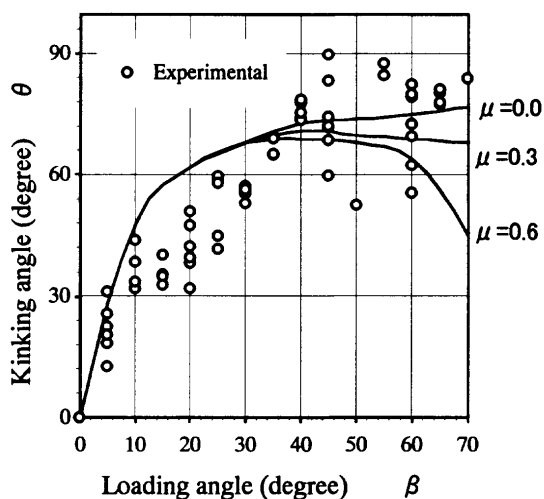


Fig. 12. Relationship between the kinking angle and the loading angle; $2a = 3\text{cm}$.

いる。しかし、載荷角度が大きくなるに伴い、折れ曲がり角度が大きくなっており、解析結果と同様な傾向を示していることがわかる。

6 結 言

本研究では、混合モード下にあるき裂進展挙動を把握するために、セメントペーストを用いた円盤型供試体による圧縮実験の結果とE積分によるエネルギー解放率の解析結果を比較検討した。その結果明らかとなったことは以下のとおりである。

(1) 本研究で行った実験条件では、初期き裂先端から1次き裂が発生し、その後2次き裂が生じる。このことは高速度ビデオカメラの映像を画像処理することによって確認した。

(2) 画像解析からき裂進展挙動を確認するには差画像を取ることがよい。

(3) 実験による最大荷重は載荷角度に対して極小値を持つ。すなわち、摩擦係数によって異なるがき裂面に対

して載荷角度が30°から50°のときが最大荷重値が小さく初期き裂が進展しやすい。このことは、エネルギー解放率の解析結果が載荷角度に対して極大値を持つことで破壊力学的にも説明できた。

(4) き裂折れ曲がり角度の測定値は、エネルギー解放率による解析結果と概ね一致する。

ぜい性材料中に初期き裂を挿入することはかなり困難である。本研究で実験に用いたセメントペーストは練り混ぜ直後は流動体で初期き裂となるPETを挿入しやすく、硬化するまでにある程度の時間がありその間にPETの位置の修正が行なえ、硬化後はぜい性的な性質を示す。

しかし、セメントペーストでは、金属などのように、疲労き裂によって真のき裂をつくるのが難しい。将来、より厳密な試験を行なうことを今後の課題としたい。

本研究を行なうにあたり、高速度ビデオカメラを貸していただいた福井県工業技術センター関係各位に衷心より感謝し、厚く御礼するしだいである。

参 考 文 献

- 1) A. A. Griffith, *Phil. Trans. Roy. Soc., London*, **A221**, 163, (1921).
- 2) A. A. Griffith, *Proc. 1st. Int. Cong. Appl. Mech., Delft*, 55 (1924).
- 3) G. R. Irwin, *J. Appl. Mech.*, **24**, 361 (1957).
- 4) 矢富盟祥, 鱈 洋一, *土木学会論文集 No.612/ I-46*, 251 (1999).
- 5) C. Yatomi, *Int. J of Solid Structure*, **19**, 183 (1983).
- 6) 例えば小林昭一, *材料*, **20**, 164 (1971).
- 7) 橋本堅一, 矢富盟祥, 石田 啓, *土木学会論文集, No. 513/I-31*, 17 (1995).
- 8) D. P. Rooke and D. J. Cartwright, *Compendium of Stress Intensity Factors*, Her Majesty's Stationery Office, 228 (1974).