

平成22年 4月30日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2009  
 課題番号：18560477  
 研究課題名（和文） 超高速ビデオカメラを用いた画像解析による圧縮荷重下での亀裂進展挙動の解明  
 研究課題名（英文） Image analysis of the unstable crack growth under compressive loading condition with ultra-high-speed video camera  
 研究代表者  
 沖中 知雄（OKINAKA TOMOO）  
 近畿大学・理工学部・講師  
 研究者番号：90298985

## 研究成果の概要（和文）：

準静的な載荷下でのき裂の不安定成長について、実験と数値解析を用いて検討を加えた。実験手法として、超高速ビデオカメラを用いた画像計測を採用した。光弾性装置を用いて供試体中の応力分布を可視化し、き裂の不安定成長過程と成長に伴うき裂先端部近傍の応力分布の変化を $\mu$ 秒単位で画像計測した。またき裂の不安定成長を解析するアルゴリズムを提案した。提案されたアルゴリズムによる解析結果は実験による画像計測結果と比較され、アルゴリズムが良好な精度をもつことが示された。

## 研究成果の概要（英文）：

Unstable crack growth under the quasi-static loading condition is studied experimentally and numerically. Images of the crack growth and the stress distribution around the growing crack tip, which is visualized by using photo-elastic technique, are successfully captured by the ultra-high-speed video camera with the frame rate of 1Mfps. Next, numerical algorithm to simulate the unstable crack growth is proposed in this work. The simulation result shows a good agreement with the experimental result, and it is shown that the proposed algorithm has the sufficient accuracy.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,200,000	600,000	3,800,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：応用力学・画像計測

## 1. 研究開始当初の背景

準静的な載荷下でのき裂の不安定成長は固体の破壊現象を考える上で重要な問題で

あり、既に多くの実験と数値解析による検討が行われている。近年毎秒数十万～百万枚の撮影が可能な超高速デジタル式ビデオカメ

ラが開発されており、実験を用いた検討手法として、これらの超高速ビデオカメラを用いた画像解析が新たな知見を得る手法として期待されている。この理由は以下の2点である：

- (1) き裂の不安定成長時に、着目する対象であるき裂先端部が高速で移動するため、先端部の移動に追従できる面的な計測が望ましい。
- (2) 変位や応力といった計測データを、移動するき裂先端位置と関連付けて計測することが望ましい。

しかしながら、研究開始当初の時点では、き裂の不安定成長問題に超高速ビデオカメラを適用して連続的に画像計測した研究の報告例は少なく、報告された研究も衝撃载荷下でのき裂の成長問題に留まっていた。この理由として、超高速デジタル式ビデオカメラで記録可能な画像枚数が数枚～100枚程度に留まっており、限定された記録可能時間にき裂の不安定成長の開始から終了までのタイミングを同期して記録することが困難であることが挙げられる。そのため、報告例は同期が比較的容易な衝撃载荷に留まっていた。しかし衝撃载荷下では、载荷によって供試体中に発生する応力の乱れと、き裂進展に伴って解放される応力分布の変化を分離することが困難であり、き裂不安定成長を検討するために十分な実験であるとは言い難い。そのため、準静的な载荷下でのき裂の不安定成長に対して画像解析を適用する手法の開発が大きな意味をもつと期待された。

また解析的な研究として様々な手法が提案されている。しかしながら、解析精度の検証として利用される実験結果は载荷点における荷重-変位関係、き裂進展経路などに留まり、き裂先端部近傍の応力場や変位場を解析結果と直接比較した研究は少なかった。そのため、数値計算の精度の検証に利用できる画像計測を行うと共に、効率的かつ精度よくき裂の不安定成長を解析できるアルゴリズムを開発することが期待された。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の2点である。

(1) 超高速ビデオカメラを用いた、準静的载荷下でのき裂の進展とき裂先端部近傍の応力分布を画像計測できる画像計測手法の確立。

(2) 準静的な圧縮荷重下で不安定成長するき裂先端部近傍の応力場の計測と数値計算による検証。

## 3. 研究の方法

超高速ビデオカメラを用いた画像計測手法のためには

- (a) 高速で撮影可能なデジタル式ビデオカ

メラ

- (b) 現象の発生とカメラの撮影タイミングを同期させる同期装置
- (c) 高速での撮影を可能にする照明装置
- (d) 応力分布を可視化するための光弾性実験装置

の4点が必要である。このうち(a)のカメラと(c)の照明装置、(d)の光弾性実験装置は研究代表者の現有資産を使用するため、本研究では(b)の同期装置を開発する。次に、開発されたシステムを(a)、(b)、(d)と組み合わせ、動的な光弾性実験システムを構築する。

開発されたシステムを用いて、準静的载荷下でのき裂進展の画像計測を行う。本研究ではまず、矩形供試体の3点曲げ試験を実施した。供試体の作成材料として光弾性感度をもつ脆性材料であるエポキシ樹脂を採用し矩形供試体を作成した。供試体下辺部中央に初期き裂を作成し、準静的な3点曲げ試験により初期き裂からき裂を不安定成長させた。不安定成長するき裂の進展状況と、光弾性実験装置により可視化された応力分布を超高速ビデオカメラにより撮影し、画像計測を行った。き裂の不安定成長開始とカメラによる撮影タイミングは開発された同期装置により同期された。

次に数値解析によるき裂進展の検証を行った。本研究では解析手法としてX-FEMを利用した。X-FEMでは、連続体中のき裂をき裂先端部近傍の変位場を表現する基底関数と、き裂による変位の不連続性を表現する変位場を表現する基底関数の重ね合わせとして表現する。そのため、き裂の成長に合わせてメッシュを移動あるいは再生成する必要がなく、またメッシュサイズと独立にき裂の進展量を決定できる。そのため効率的なき裂進展解析が可能となる。

本研究ではまず、き裂の進展解析に一般に用いられる準静的な解析の精度を検証した。解析により得られた主応力差から供試体中の干渉縞分布を再現し、実験により画像計測された結果と比較することによりその精度の検証を行った。

次にX-FEMを動的な問題に拡張し、き裂の不安定成長を動的に追跡するアルゴリズムを提案した。提案されたアルゴリズムによる解析結果は主応力差による干渉縞として実験結果と比較され、その精度が検証された。

## 4. 研究成果

本研究の主な研究成果は以下の通りである：

- (1) 動的な光弾性実験システムの開発  
本研究では、撮影対象の輝度変化を検出し、カメラに停止信号を送る同期装置を開発した。き裂の成長開始に伴い、き裂先端部での輝度が増加する。この変化を検出することにより、き裂の不安定成長

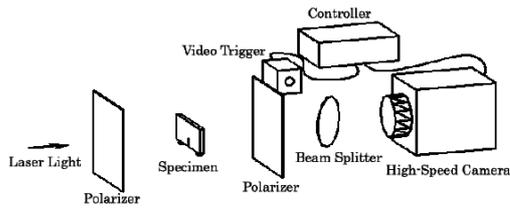


図-1 開発された動的弾性システムの概略図

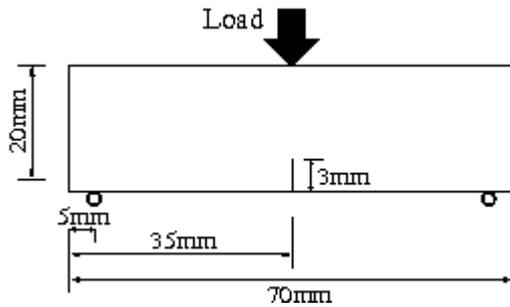
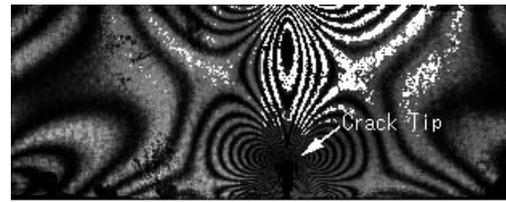


図-2 供試体概要図

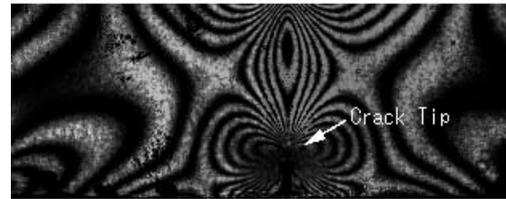
の開始とカメラの撮影タイミングの同期を図った。開発された同期装置を超高速ビデオカメラ、照明装置、光弾性実験装置と組み合わせることにより、き裂の不安定成長を画像計測できる動的弾性実験システムを作成した。完成した装置の概要を図-1 に示す。

(2) 準静的载荷下でのき裂不安定成長の画像計測

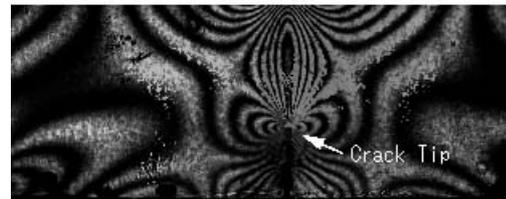
図-1 に示す動的弾性実験装置を用いて、準静的な 3 点曲げ载荷下でのき裂の不安定成長の画像計測を行った。供試体の形状を図-2 に示す。不安定成長するき裂の進展挙動と、光弾性装置により可視化された供試体中の応力分布は超高速ビデオカメラにより画像計測された。計測速度は毎秒 100 万枚とし、 $1\mu$  秒毎に撮影を行った。撮影結果を図-3 に示す。図中には撮影された 103 枚の画像から  $5\mu$  秒毎に 5 枚の画像を抜き出して示している。き裂進展開始前にき裂先端部近傍で高い縞次数を示しているが、き裂の進展に伴って縞次数が減少し、応力の集中が緩和されていることが分かる。またき裂の十分遠方では、き裂の進展に伴って応力が緩和されるとともに、き裂面の生成に伴って解放される応力波の伝播が確認された。この結果から、図-1 で示された動的弾性実験システムが、超高速ビデオカメラを用いて準静的载荷下でのき裂の進展とき裂先端部近傍の応力分布を画像計測する計測手法として十分な能力をもつことが示された。これにより、本研究の目的(1)が達成された。



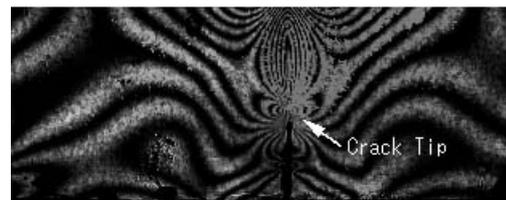
(a) time:  $0\mu$ s



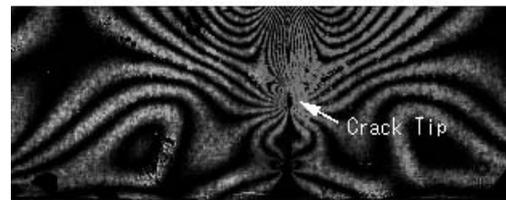
(b) time:  $5\mu$ s



(c) time:  $10\mu$ s



(d) time:  $15\mu$ s



(e) time:  $20\mu$ s

図-3 画像計測結果

(3) 準静的解析精度の検証

既往のき裂進展の数値解析では、準静的解析が多く用いられている。き裂の不安定成長を準静的に解析することによる精度を検証するため、X-FEM を用いて準静的解析を行った。(2) に示した実験について、き裂が長さ 9.44mm に成長した段階での解析結果を図-4 に示す。図中には、解析により得られた主応力分布から再現された干渉縞分布を示している。き裂長さ 9.44mm は図-3(e) に対応するき裂長さであるが、図-3(e) に示された干渉縞分布と図-4 に示された干渉縞分布は大きく異なる。

また、同様の検討を対向する平行き裂を

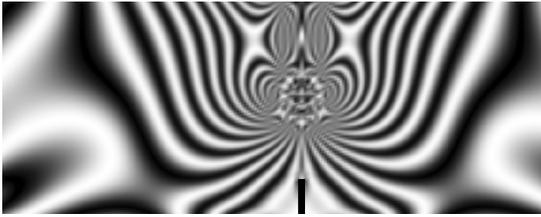
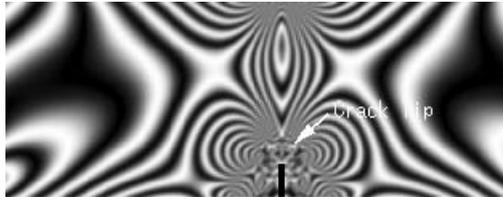
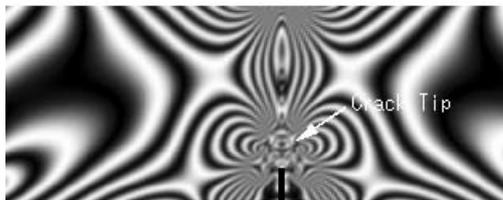


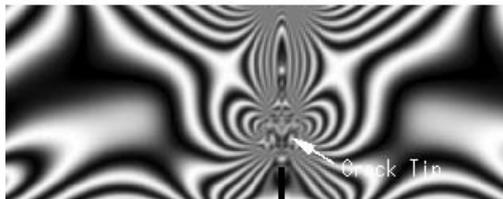
図-4 準静的解析による解析結果



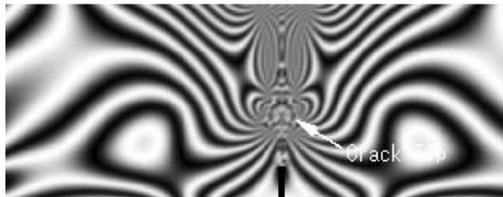
(a) time: 0 μs



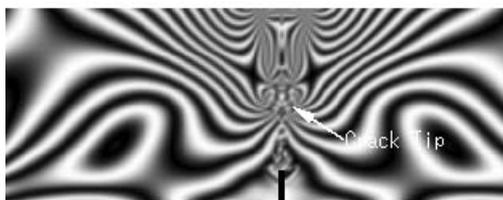
(b) time: 5 μs



(c) time: 10 μs



(d) time: 15 μs



(e) time: 20 μs

図-5 動的解析結果

もつ矩形供試体の準静的引張荷重下でのき裂の不安定成長問題についても適用した(沖中知雄他, 土木学会論文集, Vol. 65, pp. 321-334, 2009). き裂進展経路の比較

では実験結果と解析結果は良好な一致を示したが、応力分布では両者の著しいかい離が認められた。

これらの検討から、き裂の不安定成長を準静的に解析しても応力分布の再現性が低いことが示された。また、既往の研究で解析精度の検証として多く用いられているき裂進展経路の比較は、検証手段として適切でないことが示された。

#### (4) 動的 X-FEM の提案と精度検証

X-FEM を動的な問題に拡張することにより、き裂の不安定成長問題を動的に解析するアルゴリズムを提案した。提案されたアルゴリズムを(2)に示した矩形供試体の3点曲げ試験に適用し、解析精度の検討を行った。解析により再現された干渉縞分布を図-5に示す。図-5に示された干渉縞分布は、図-3に示された実験結果とよく一致しており、提案されたアルゴリズムが良好な精度をもつことが示された。この結果から、本研究の目的(2)が達成された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Tomoo Okinaka, Pavel Karimov, Takeharu Etoh, and Kenji Oguni, Crack propagation imaging by the ISIS camera and a video trigger system, Proceedings of IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, Volume 6491, pp64910Y1-10, 2007, 査読無し
- ② 沖中知雄, パベル・カリモフ, 江藤剛治, 静的荷重下で進展を開始する亀裂先端部近傍の応力場の超高速ビデオカメラを用いた可視化, 応用力学論文集, Vol.10, 301-309, 2007, 査読有
- ③ 若井淳, 沖中知雄, 堀宗朗, 小国健二, 三次元 PDS-FEM を用いた平行亀裂の進展経路の評価, 応用力学論文集, Vol.11, 141-148, 2008, 査読有
- ④ 沖中知雄, 堀宗朗, 小国健二, 超高速ビデオカメラと X-FEM を用いた並行亀裂の進展経路に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.65, 321-334, 2009, 査読有
- ⑤ 沖中知雄, 準静的載荷下でのき裂の不安定成長の実験と数値解析による検討, 機械学会論文集, Vol.75, 65-73, 2009, 査読有
- ⑥ Kenji Oguni, M.L.L. Wijerathne, Tomoo Okinka and Muneo Hori, Crack Propagation analysis using PDS-FEM and comparison with fracture

experiment, *Mechanics of Materials*,  
Vol.41, 1242-1252, 2009, 査読有

〔学会発表〕(計1件)

- ① 沖中知雄, 超高速ビデオカメラを用いた  
2方向画像計測手法のき裂分岐現象への  
適用, 高速度イメージングとフォトニク  
スに関する総合シンポジウム2009, 2009

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

沖中 知雄 (OKINAKA TOMOO)  
近畿大学・理工学部・講師  
研究者番号: 90298985

### (2) 研究分担者

竹原 幸生 (TAKEHARA KOUSEI)  
近畿大学・理工学部・教授  
研究者番号: 50216933