

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420467

研究課題名(和文) 一軸圧縮荷重下での3次元内部き裂進展メカニズムについての実験および解析的研究

研究課題名(英文) Experimental and numerical study on the three dimensional wing crack under uniaxial compression

研究代表者

沖中 知雄 (OKINAKA, Tomoo)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：90298985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：圧縮荷重下でのウィングき裂の進展挙動を、実験と解析を用いて検討した。実験では、透明供試体中のき裂の進展挙動に、超高速ビデオカメラを用いた高時間分解能な画像計測を適用した。また光弾性手法を用いて供試体中の応力場を干渉縞として可視化し、き裂進展状況と合わせて計測した。その結果、2次元及び3次元のウィングき裂の進展挙動と進展に伴う供試体中の応力場の変化を毎秒50万枚の撮影速度で画像計測することに成功した。解析では、動的PDS-FEM解析手法と接触問題を組み合わせ、圧縮荷重下での2次元のき裂進展挙動に適用した。実験結果との比較により、解析手法が実験結果を精度よく再現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：The unstable crack growth of the wing crack under the uniaxial compression is discussed experimentally and numerically. In experimental discussion, images of unstable growth of two and three dimensional wing cracks are captured by the ultra-high-speed camera with the frame rate of 500k frames per second. Stress field in the specimen including propagating cracks is visualized by means of photo-elastic technique, and images of the resultant fringe pattern are also captured by the high-speed camera successfully. Next, two dimensional dynamic numerical analysis is performed. PDS-FEM (Particle Discretization Scheme), which allows the discontinuity of the displacement in the continuous body, is combined with the contact surface algorithm, and applied to simulate the unstable growth of the wing crack dynamically. The accuracy of the simulation is discussed through the comparison with the images which are captured by the high speed camera, and they showed a good agreement.

研究分野：応用力学

キーワード：PDS-FEM 画像計測 内部き裂

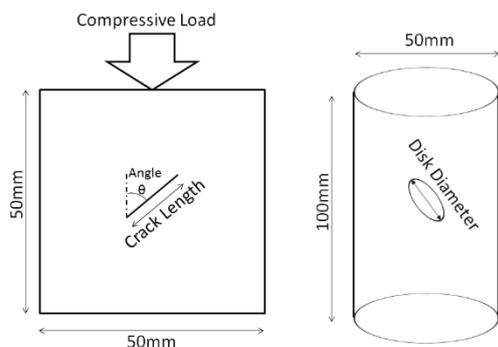
1. 研究開始当初の背景

圧縮荷重下で初期欠陥を含む材料中で進展するウイング型き裂の挙動は、コンクリートや岩盤などの破壊を考える上で重要な問題である。圧縮荷重下での載荷方向から傾いた初期き裂を起点とするき裂進展では、初期き裂両端から Wing き裂と呼ばれるモード I き裂が載荷方向に沿って進展することが明らかにされている。しかしながら、き裂周りの応力場や変位場をき裂進展状況と合わせて計測し、き裂の進展開始や停止といったき裂の進展メカニズムや進展中のき裂を含む供試体中の応力場を検討した研究例は少ない。高速で移動するき裂先端部周りの計測には面的な計測が可能な画像計測が適しているが、既往の研究例では時間分解能が数百 μ 秒に留まっており、き裂挙動の解明に十分な時間分解能とは言い難い。中には準静的な圧縮荷重下での 2 次元き裂の進展について、超高速ビデオカメラを用いた毎秒 25 万枚 (時間分解能 4 μ 秒) での画像計測を適用すると共に、光弾性手法を適用することによって供試体中の応力場を干渉縞として可視化し、画像計測することに成功している。そこで本研究では、時間分解能を改善した画像計測を圧縮荷重下でのき裂進展の画像計測に適用し、2 次元および 3 次元での Wing き裂進展過程の解明を試みる。

またき裂進展挙動の検討のためには、実験のみでなく数値解析を用いた実験結果の再現と検討が必要である。Lalith は 2 次元及び 3 次元の準静的なき裂進展解析に PDS (Particle Discretization Scheme) 法を適用した。PDS 法は重なりのない不連続な基底関数を用いて変位や応力を離散化する数値解析手法である。基底関数の不連続面に沿って連続体中の不連続面を表現できるため、メッシュの再生成や要素内へのペナルティ関数の導入をすることなくき裂とその進展を解析することが可能であり、動的問題への拡張も容易である。そこで本研究では、動的 PDS-FEM 解析手法に圧縮荷重による接触問題を組み合わせ、圧縮荷重下での Wing き裂進展の数値解析を試みる。

2. 研究の目的

本研究では、まず準静的な圧縮荷重下で初期



(a) 2次元用供試体 (b) 3次元用供試体

図-1 供試体概要図

き裂から進展を開始するウイング型き裂の進展挙動に、超高速ビデオカメラを利用した高時間分解能の画像計測を適用することを試みる。供試体作成材料として光弾性感度をもつ脆性材料である透明エポキシ樹脂を採用し、光弾性手法を用いて供試体中の応力分布を干渉縞として可視化する。これにより、き裂の進展状況と同時に供試体中の応力場の変化を高時間分解能かつ連続的に画像計測する。画像計測により、き裂の進展過程のみでなく、進展開始、停止、再進展といったき裂の不安定挙動を実験的に検証する。

次に、圧縮荷重下でのき裂の不安定成長に動的な 2 次元き裂進展解析を適用する。き裂の進展挙動を詳細に検討するための準備として、本研究ではき裂が高速で進展している供試体中の応力場の再現を試みる。解析手法としていたるところ不連続かつ重なりのない形状関数を用いて連続体中の変位を離散化することにより不連続な変位場を簡便に導入できる解析手法である PDS-FEM を採用する。PDS-FEM ではき裂の進展経路が重なりのない形状関数間の境界に限定されるものの、連続な変位場の離散化と不連続性を含む変位場の離散化がシームレスに接続されており、き裂の進展解析への適用が容易である。そこで本研究では、PDS-FEM と接触問題を組み合わせた動的解析手法を開発し、圧縮荷重下で不安定成長するウイング型き裂の動的解析を行う。解析により、高速で進展しているき裂を含む供試体中での応力場の再現を試みる。

3. 研究の方法

本研究では実験と数値解析を用いて検討を行った。実験として、初期欠陥を含む透明供試体を作成して一軸圧縮試験を行い、初期欠陥を起点として進展する Wing き裂の進展状況の検討を行った。数値解析では PDS-FEM を用いて動的なき裂進展とき裂進展に伴う供試体中の応力場の変化の再現を行った。以下にその詳細を記述する。

実験を用いた検討として、本研究ではまず、2 次元での Wing き裂進展過程を検証する目的で初期欠陥をもつ矩形供試体を作成し、一軸圧縮破壊試験を行った。供試体の概要を図-1(a)に示す。供試体の作成材料として、光弾性感度をもつ透明な脆性材料であるエポキシ樹脂を採用し、中央部に載荷方向と 45° の角度をもつ初期き裂を含む矩形供試体を作成した。

次に、3 次元での Wing き裂進展過程を検証する目的で、初期欠陥を含む円筒供試体を作成し、一軸圧縮破壊試験を行った。供試体の概要を図-1(b)に示す。初期欠陥として厚さ 0.1 mm の薄型鋼製円盤を採用し、載荷軸方向と 45° の角度をもつ初期欠陥を含む直径 50mm、高さ 100 mm の円筒供試体を作成した。供試体の作成材料としてエポキシ樹脂を採用した。作成された供試体を用いて一軸圧縮破壊試験を実施した。実験装置の概要を図-2 に示す。

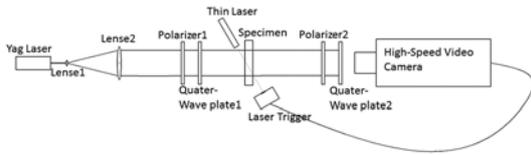


図-2 実験装置概要

供試体を変位制御型の圧縮試験装置に固定し、0.5mm/分の载荷速度で初期き裂からき裂が進展するまで载荷を継続した。供試体は下端を固定し、上端部にテフロンシートで摩擦力を低減した上で球座をもつ治具を介して载荷している。

き裂の進展状況の計測には、超高速ビデオカメラによる高時間分解能な画像計測が適用された。超高速ビデオカメラによる撮影には光量が必要であるため、Yag レーザーを光源とする平行光を透明供試体の片側から照射し、供試体の反対方向から透過像を撮影した。

さらに供試体を 1/4 波長板と偏光板で挟み込むことによって供試体中の主応力差を干渉縞として可視化し、き裂の進展状況とあわせて画像計測した。円筒形供試体を用いた 3 次元圧縮破壊試験では、円形断面をもつ供試体のレンズ効果により透過画像の撮影が困難となる。このため、透明な実験用水槽中に供試体を設置し、供試体作成材料と同じ屈折率になるよう調整した溶液で水槽を満たす液浸実験を行った。溶液は液体パラフィンとアルファブROMナフタレンの混合液とし、別途計測した供試体作成材料の屈折率と一致するよう二液の混合比率を調整した。

超高速ビデオカメラは時間分解能が高い反面、記録可能な画像数が限定される。本研究で使用したカメラの場合は記録可能な画像が 102 枚であり、毎秒 50 万枚の撮影速度で撮影した場合の記録時間は 20 μ 秒に留まる。限定された記録可能時間内にき裂の進展開始から終了までを記録するためには、供試体中のき裂の進展開始とカメラの撮影タイミングを同期させる必要がある。本研究では、同期装置としてレーザートリガーを作成して使用した。この同期装置では、き裂の予想進展経路上に予め細かいレーザーを照射し、透過光をフォトダイオードで受光する。き裂の進展に伴って生成されたき裂面によりレーザーの透過が阻害されると、透過光の光量が低下する。同期装置は透過光量の低下を感知して、カメラに同期信号を送信する。この装置を用いて記録可能な時間内にき裂の進展開始から停止までを記録することを試みた。

数値解析を用いた検討として、本研究では変位の不連続性を表現できる解析手法である PDS-FEM を用いて 2 次元の動的なき裂進展解析を行った。

PDS-FEM では、解析領域を Voronoi ブロック Φ^α と共役な Delaunay ブロック Ψ^β に分割

する。Voronoi ブロック内で変位を一定と仮定し、変位を

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{\alpha} \mathbf{u}^{\alpha} \phi^{\alpha}(\mathbf{x})$$

として離散化する。ここで $\phi^{\alpha}(\mathbf{x})$ は Φ^{α} 内で 1、それ以外で 0 となる特性関数である。

同様に、変位の勾配が Delaunay ブロック内で一定と仮定し、変位の勾配 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ を

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \sum_{\beta} \mathbf{g}^{\beta} \psi^{\beta}(\mathbf{x})$$

として離散化する。ここで $\psi^{\beta}(\mathbf{x})$ は Ψ^{β} 内で 1、それ以外で 0 となる特性関数である。

誤差 E^g を

$$E^g \equiv \int_V \|\sum_{\beta} \mathbf{g}^{\beta} \psi^{\beta}(\mathbf{x}) - \nabla(\sum_{\alpha} \mathbf{u}^{\alpha}(\mathbf{x}) \phi^{\alpha}(\mathbf{x}))\|^2 dV$$

と定義し、 E^g を最小化するように $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ を決定すれば、

$$\mathbf{g}_{ij}^{\beta} = \frac{1}{A_{\beta}} \int_{\partial \Psi^{\beta}} \sum_{\alpha} n_i u_j^{\alpha} \phi^{\alpha}(\mathbf{x}) d\Gamma$$

となり、Delaunay ブロックの境界積分として変位の勾配 \mathbf{g} が変位 \mathbf{u} を用いて離散化される。ここで A^{β} 、 \mathbf{n} は各々 Ψ^{β} の面積と境界の外向き法線ベクトルである。PDS-FEM で定義した $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ は不連続であるため二乗項を含む E^g は積分不能であるが、本定式化では E^g の微分をとることでこれを回避している。

Delaunay ブロック内のひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^{\beta}$ を $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{\beta} = \frac{1}{2}(g_{ij}^{\beta} + g_{ji}^{\beta})$ 、応力 $\boldsymbol{\sigma}^{\beta}$ を $\sigma_{ij}^{\beta} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{\beta}$ とすることにより、Delaunay ブロック内での剛性行列が得られる。全体剛性行列は、各ブロックの剛性行列を組み合わせることで求められる。

き裂進展解析への適用では、解析メッシュ中への不連続面の導入が問題となる。PDS-FEM では Voronoi ブロック間で変位が不連続であるとして定式化されているため、Voronoi 境界に沿って不連続面を挿入することが許容される。従って境界積分に不連続面として定義された Voronoi 境界を含めることにより、定式化を変更することなく不連続面を含む Delaunay ブロックの剛性行列を求めることができる。

4. 研究成果

二次元 Wing き裂進展の画像計測の例として、き裂角度 45°、き裂長さ 15mm の供試体を用いた一軸圧縮試験結果を示す。この供試体中では荷重 16.3kN で初期き裂両端からウイング型き裂が進展し、供試体の破断に至った。この供試体における 2 次元き裂の進展状況と供試体中の応力分布の画像計測結果を図-3 に示す。図-3 中では、時間分解能 2 μ 秒/frame (撮影速度毎秒 50 万枚)、空間分解能 0.258mm/pixel で計測された 102 枚の画像から、8 μ 秒毎に 12 枚の画像を抜き出して示している。また画像中の時刻は供試体中でき裂が最初に進展を開始した時刻を 0 とし、以降の画像に 2 μ 秒刻みで時刻を割り振っている。

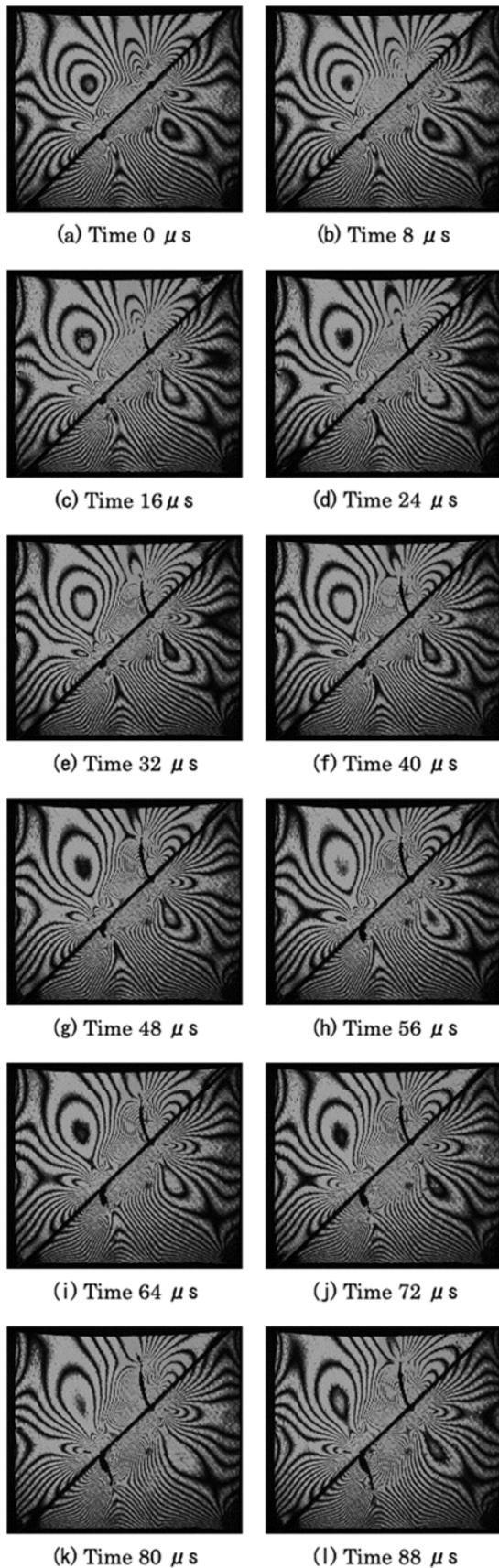


図-3 二次元 Wing き裂進展の画像計測

供試体中のき裂の進展は初期き裂右上端部で開始され、44 μ 秒後に初期き裂左下端部から

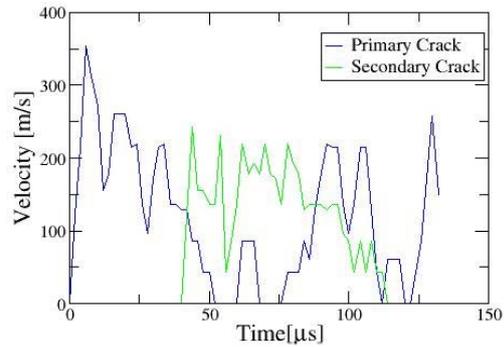


図-4 き裂進展速度

もき裂が進展を開始した。記録された各画像から読み取ったき裂進展速度を図-4 に示す。き裂の先端位置は、読取り誤差の影響を軽減する目的で前後 1 枚を含む 3 枚の移動平均をとって平滑化している。初期き裂右上端部から供試体の上方向に進展したき裂は 54 μ 秒で進展を停止し、80 μ 秒で再び進展を開始する。再進展を開始したき裂は進展と停止を繰り返しながら成長し、最終的に供試体上端部に達した。一方、初期き裂左下端部から進展を開始するき裂は停止することなく進展を続け、144 μ 秒で停止した。

三次元 Wing き裂の画像計測結果の例として、載荷方向と 45° の角度をもつ直径 10mm、厚さ 0.1 mm の薄板円盤を含む供試体の圧縮破壊試験に画像計測を適用した結果を図-5 に示す。図-5 に示された供試体中では、荷重 73.2kN で初期欠陥下端からき裂が進展を開始した。進展したき裂は初期欠陥下端周辺に沿って下方方向に成長し、進展を停止した。載荷を続けると、89.4kN で供試体上端部からき裂が進展を開始した。進展したき裂は初期欠陥上端周辺に沿って上方に進展し、停止した。さらに載荷を継続すると、初期欠陥上下端部で発生した Wing き裂は進展と停止を繰り返したが、これらのき裂が供試体の破断に繋がることはなかった。図-5 中には 73.2kN における下端部のき裂進展と 89.4kN における上端部のき裂進展を撮影速度 50 万枚/秒で撮影した結果から、各々 4 μ 秒毎に 4 枚の画像を抜き出して示している。

次に、2次元 Wing き裂の動的進展解析結果を示す。解析では、破壊荷重 16.3kN を載荷された供試体中で、初期き裂両端部からき裂を進展させることにより、2次元の動的なき裂進展解析を行った。破壊荷重を静的に載荷された状態を初期状態とし、中央差分法を用いて

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}$$

を逐次的に解くことにより解析を行った。

ここで、 \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} は各々質量、減衰、全体剛性マトリックスである。本研究では、質量は集中質量、減衰としてレイリー減衰を採用して解析を行った。

各時間ステップでのき裂先端位置は、実験により計測された画像から得られたき裂先端位

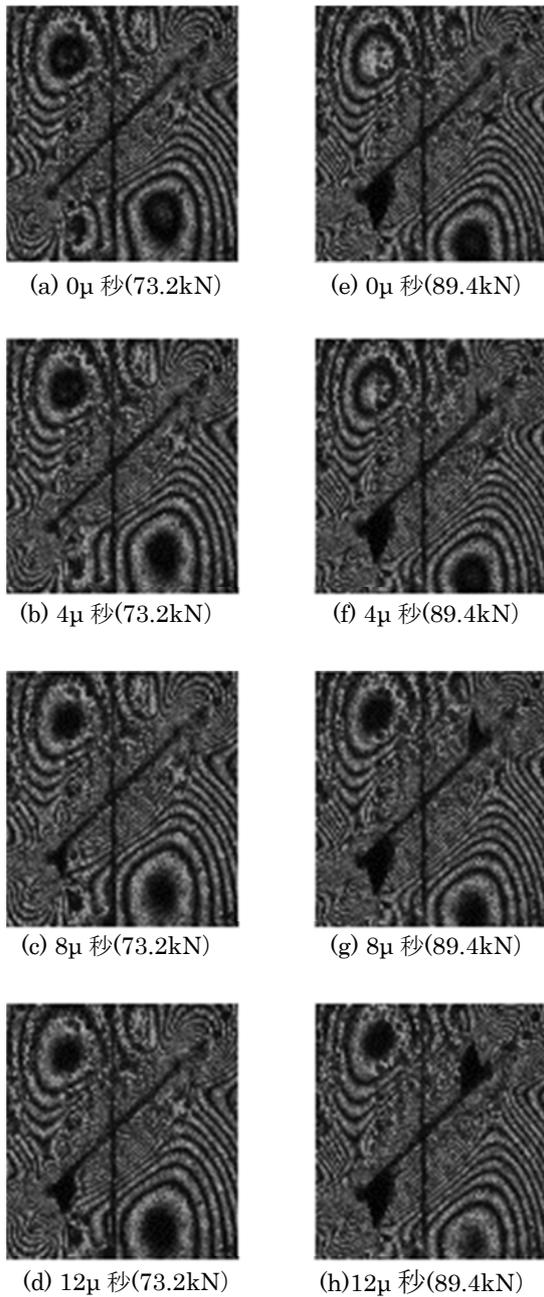


図-5 三次元 Wing き裂進展の画像計測

置を内挿して決定し, Voronoi ブロック境界に沿ってき裂面 Γ_c を進展させた. き裂面 Γ_c を含む Delaunay ブロック Ψ^β では, き裂面を加えた境界積分

$$g_{ij}^\beta = \frac{1}{A_\beta} \int_{\partial\Psi^\beta + \Gamma_c \cap \Psi^\beta} \Sigma_\alpha n_i u_j^\alpha \phi^\alpha(x) d\Gamma$$

を求めることにより, 各時間ステップでの剛性行列を決定した. 各 Delaunay ブロックで求めた g_{ij}^β を組み合わせた全体剛性行列を用いることにより, 各時間ステップでの解を求めた. 解を求めるにあたり, 各時間ステップ毎に初期き裂面での接触判定を行っている.

供試体 A におけるき裂進展解析結果を図-6 に示す. き裂の進展開始から 100 μ 秒後までの解析結果から, 8 μ 秒刻みの 8 枚のき裂周辺領域の画像抜き出して示している. 図中には,

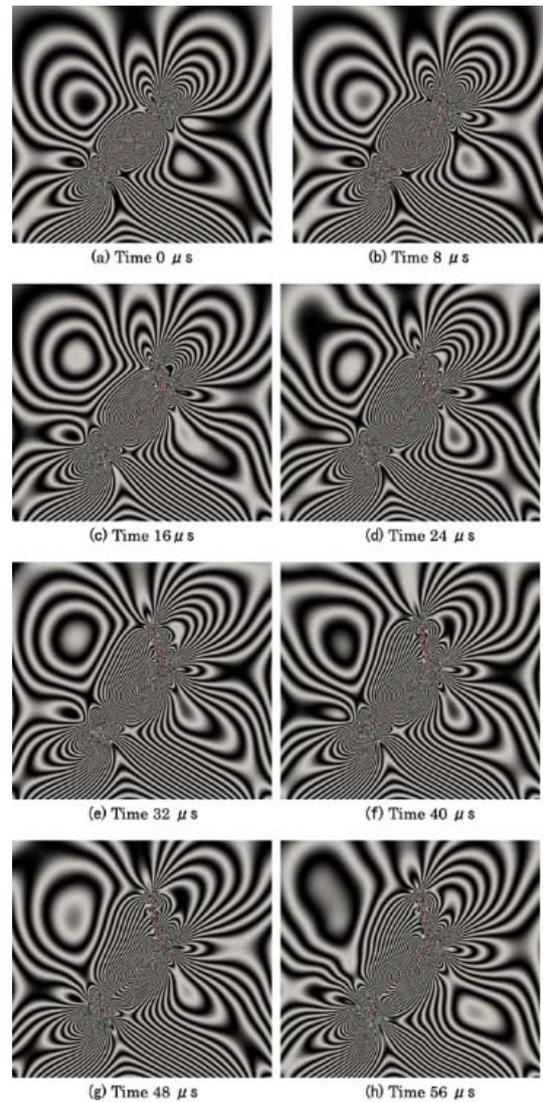


図-6 二次元 Wing き裂の動的解析

解析により得られた応力分布を用いて再現した干渉縞を示しており, また初期き裂と進展き裂位置が赤線で示されている.

再現された干渉縞を図-3 に示された実験結果と比較すると, 初期き裂右上から進展するき裂の右側領域で干渉縞形状が異なる部分もみられるが, それ以外のき裂周辺の領域では干渉縞次数, 干渉縞形状とも良好に一致しており, 2次元 Wing き裂の進展が精度よく解析されていると判断できる.

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 2 件)

- ① Tomoo Okinaka and Lalith Wijerathne, Experimental and Numerical Study on the Unstable Crack Growth under Uniaxial Compression, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, DOI:10.1117/12.2271075, 2017, 査読有

- ② 沖中知雄, Lalith Wijerathne, 一軸圧縮荷重下でのき裂進展挙動についての実験および解析的研究, 土木学会論文集 A2, Vol. 72, No. 2, I_357-I_365, 2016, 査読有

[学会発表] (計 2 件)

- ① 沖中知雄, Lalith Wijerathne, 一軸圧縮荷重下でのき裂進展挙動についての実験および解析的研究, 第 19 回応用力学シンポジウム, 2016
- ② Tomoo Okinaka and Lalith Wijerathne, Experimental and Numrical Study on the Unstable Crack Growth under Uniaxial Compression, The 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 2016

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・准教授
研究者番号：90298985

(2) 研究分担者

マッデゲダラ ラリット (MADDEGEDAR, Lalith)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：20426290