

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22560489

研究課題名(和文) 画像解析によるモード き裂の不安定成長の実験的検証と数値解析手法の確立

研究課題名(英文) Experimental and Numerical Study on the Unstable Mode II Crack Growth with Image Analysis

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) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：圧縮荷重下でのき裂進展メカニズムを明らかにする目的で、一軸圧縮荷重下での2次元き裂進展実験、圧縮荷重下での3次元内部き裂進展実験及び数値解析を行った。一軸圧縮荷重下でのき裂進展実験では、超高速ビデオカメラと光弾性手法を組み合わせてき裂の進展状況と応力分布の変化を高い時間分解能で画像計測した。その結果、き裂の進展挙動には供試体中を伝播する応力波が大きな影響を与えている可能性が示された。また、3次元内部き裂進展実験に高時間分解能な画像計測を適用することにより、3次元き裂の進展過程を可視化することができた。PDS-FEMを用いた3次元内部き裂の進展解析は、実験結果と定性的には良好な一致を見せた。

研究成果の概要(英文)：To study the unstable crack growth mechanism under compressive loading, the experiment of two dimensional crack growth under uni-axial compression, the experiment and numerical simulation of three dimensional inner crack growth has been performed. Image analysis with ultra-high-speed camera is applied to the two dimensional unstable crack growth under quasi-static uniaxial compression. Stress field around the moving crack tip is visualized by means of photo-elastic technique and images of growing cracks and the stress field are captured with the frame rate of 250,000 fps. As a result, it is revealed that the crack growth is affected by the stress wave travelling the specimen. Image analysis with ultra-high speed camera is also applied to the three dimensional inner crack growth, and the growth is visualized successfully. Numerical analysis with PDS-FEM technique is applied to the three dimensional inner crack growth, and the result shows a good agreement with the experimental result.

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：画像計測 光弾性実験 超高速ビデオカメラ

### 1. 研究開始当初の背景

圧縮荷重下で初期欠陥から進展を開始するモードI及びモードIIき裂はコンクリート構造物の健全性評価や岩盤の挙動予測等を考える上で重要な問題である。既に多くの実験的な研究が行われており、載荷方向から傾いた初期欠陥両端部からWingき裂が進展することがよく知られている。しかしながら既往の研究の多くはき裂の進展開始前もしくは停止後を対象としている。コンクリートや岩盤等の内部に微視欠陥を有する材料の圧縮荷重下での変形、破壊挙動では、内部欠陥を起点とするき裂が進展と停止を繰り返す。そのため、コンクリートや岩盤等の変形、破壊挙動を検討するためには停止中のき裂のみでなく、進展中のき裂に着目してその進展挙動や進展に伴うき裂周りの応力分布の変化を実験と数値解析を通して明らかにすることが重要である。

高速で進展するき裂を対象としてき裂の進展状況とき裂先端部周りの変位場や応力場を計測するためには、面的な計測が可能な画像計測が適している。き裂先端部の移動速度が高速であるため、画像計測には撮影速度の速い高速ビデオカメラを使用した時間分解能の高い計測が必要である。

時間分解能の高い画像計測を引張荷重下でのき裂進展現象に適用した研究は多く報告されている。一方、圧縮荷重下でのき裂進展に時間分解能の高い画像計測を適用した既往の研究は少ない。準静的な圧縮荷重下でのき裂進展に限定すれば、高速ビデオカメラを用いた既往の研究は比較的時分解能の低い計測に留まる。衝撃載荷下では時間分解能の高い画像計測によるき裂進展現象の計測結果も報告されているが、衝撃載荷下でのき裂進展現象では載荷に起因して供試体中を伝播する応力波とき裂の進展に伴って発生する応力波とを分離することが困難であり、き裂の進展に伴う応力分布の変化の検証に適しているとは言い難い。

そのため、準静的な荷重下でのき裂進展に着目し、き裂の進展とそれに伴う応力分布の変化を高い時間分解能で画像計測すると共に、き裂の進展を動的に追跡できる数値解析アルゴリズムの確立し、き裂進展のメカニズムを明らかにすることが重要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、準静的な1軸および2軸圧縮荷重下でのき裂進展メカニズムを明らかにすることである。そのために、以下の2点を目的とする：

(1) 準静的な1軸及び2軸圧縮荷重下でのき裂進展に時間分解能の高い画像計測を適用する。画像計測に際し、光弾性手法を利用して供試体中の応力分布を可視化することにより、き裂の進展状況とき裂の進展に伴うき裂選点部近傍の応力分布の変化を同時に計測する。

(2) き裂の進展を動的に追跡する数値解析手法を確立する。

### 3. 研究の方法

#### [2 次元き裂進展実験]

本研究では光弾性感度をもつ脆性材料であるエポキシ樹脂を使用して50mm×50mm×10mmの矩形の透明供試体を作成した。中央部にパラフィンワックス製平板(20mm×10mm×0.3mm)を載荷方向と45度の角度をもつように固定した型枠にエポキシ樹脂を充填した。樹脂硬化後に熱処理によってパラフィンワックスを除去し、供試体中央部に長さ20mm、厚さ0.3mmの貫通き裂を作成した。供試体はパラフィンワックス除去後に再度熱処理を行い、残留応力を除去している。作成された矩形供試体を用いて、圧縮破壊試験を行った。本研究では応力分布を可視化する目的で光弾性装置を用いた。光源として採用されたYaG(波長532nm)から出力されたレーザー光を用いて平行光を形成し、載荷装置に設置された供試体を照射する。供試体を2枚の偏光板と1/4波長板で挟み込むことにより、供試体内部の主応力差が干渉縞として可視化される。

供試体を高さ30mmの鋼板で挟み込み、球座を介して載荷することにより、供試体上下面に一様な圧縮応力を作用させた。載荷は荷重制御とし、供試体中の初期き裂からき裂が進展を開始するまで載荷試験を行った。準静的な載荷条件とするため載荷速度は6kN/minに設定した。

準静的な圧縮荷重下で初期き裂から進展を開始するき裂とき裂の進展に伴う供試体中の応力分布の変化は、超高速ビデオカメラ(312×260画素)を用いて毎秒25万枚の撮影速度で画像計測される。本研究で使用した超高速ビデオカメラは記録可能画像数が103枚であり、時間分解能4μ秒とした場合の記録可能時間は412μ秒となる。上書き撮影が可能であるため撮影開始時刻は任意に設定することが可能であるが、記録可能時間内にき裂の進展開始から停止までを記録するためにはき裂の進展開始後400μ秒以内に進展開始を検出してカメラに撮影停止信号を送信する同期装置が必要となる。このための同期装置として、本研究では透明導電性塗料を用いたき裂検出装置を使用した。初期き裂を取り囲むように塗布された透明導電性塗料がき裂の進展により遮断されると、同期装置は電気信号の途絶を検知してカメラに撮影停止信号を送出する。

本研究で供試体作成材料として採用したエポキシ樹脂中のき裂進展速度は最大で400m/s程度であるため、超高速ビデオカメラの時間分解能4μ秒はき裂進展量1.6mm/frameに相当する。また空間分解能は0.19mm/pixelとした。このため、1フレームでのき裂進展量は最大8.4pixelとなり、カメラの画像サイズ312×260を考慮すれば十分

な分解能をもつものといえる。

### [3次元内部き裂進展実験]

2軸圧縮応力による2次元せん断き裂の進展実験が困難であったため、混合モードで進展する圧縮荷重下での3次元内部き裂の進展を本研究での実験方法として採用した。

そのために、透明な脆性材料であるエポキシ樹脂を用いて50×100mmの円筒型供試体を作成した。初期欠陥として、供試体中央部に厚さ0.5mm、直径20mmのアルミニウム製円盤を載荷方向と45°の角度を持つように配置した。亀裂面の摩擦が内部き裂の進展に影響を与えと考えられるため、初期欠陥として円盤上下面に離型剤を塗布した欠陥、円盤上下面に厚さ0.05mmのシリコンゴムを添付した欠陥、2枚の円盤を使用して円盤間にグリースを塗布した欠陥の3種類を用意した。

作成された供試体を用いて一軸圧縮試験を行い、内部欠陥からき裂を進展させた。き裂の進展状況は超高速ビデオカメラを用いて画像計測された。

### [き裂進展解析]

研究当初計画では一般化有限要素法の一つであるX-FEMを拡張して解析に適用する予定であったが、計画を変更してPDS(Particle Discretization Scheme)法を適用することとした。そのため、東京大学地震研究所 Madegedara Lalith 準教授との共同研究として解析を実施した。

PDS-FEMは重なりが無い不連続な基底関数を用いて変位を離散化する解析手法である。変位の不連続面であるき裂は基底関数の不連続面で再現されるため、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、き裂とその進展を連続的に解析することができる。またペナルティ関数を使用した無いため、解析はき裂のモードに依存しない。

本研究では不連続面に接触アルゴリズムを導入することにより、圧縮荷重下でのき裂進展解析のためのアルゴリズムを構築した。

## 4. 研究成果

### [2次元き裂進展実験結果]

圧縮試験後の供試体を図1に示す。図1に示す供試体は各々16.0kNで初期き裂上下端からき裂が進展を開始した。進展したき裂は供試体上下端部に達する前に進展を停止したため、供試体の破断には至っていない。

供試体中におけるき裂の進展状況とき裂の進展に伴う干渉縞の変化を超高速ビデオカメラで画像計測した結果を図2に示す。時間分解能4μ秒の撮影速度で撮影された103枚の画像のうち、4枚の画像を示している。ここで時刻は記録された103枚の画像の1枚目を時刻0と設定している。初期き裂左下端部でき裂の進展開始が画像から確認できるのは188μ秒であるが、184μ秒で干渉縞が動き始めており、き裂先端部近傍でマイクロな破



図1 試験後の供試体

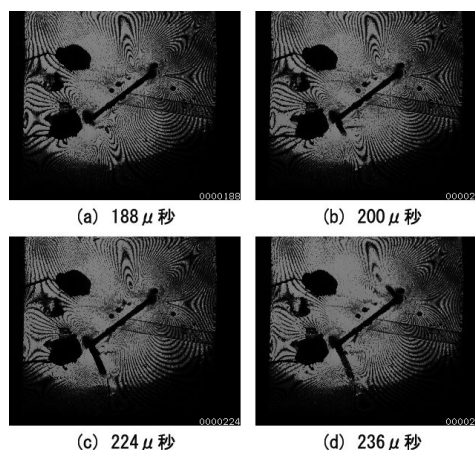


図2 き裂進展状況 (25万 fps)

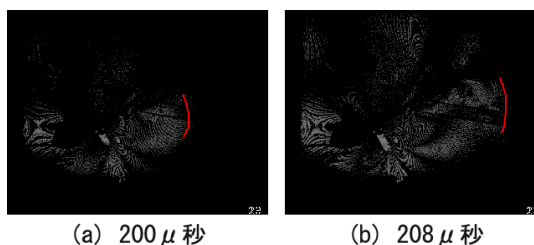


図3 供試体中の応力波伝播

壊が発生してき裂の進展が開始していると考えられる。初期き裂左下端部から進展を開始したき裂はその後供試体下方向に進展し、244μ秒でその進展を停止した。左下端部からのき裂進展開始から40μ秒後の時刻224μ秒に、初期き裂右上端部からもき裂が進展を開始した。遅れて進展を開始したき裂は供試体上部方向に進展し、260μ秒でその進展を停止した。

供試体中でのき裂の進展に伴う応力分布の変化を検討する目的で、き裂進展開始後の192μ秒と200μ秒における応力分布とき裂進展開始前の応力分布との比較を図3に示す。図中の黒い領域は干渉縞に変化が無い、すなわち応力分布に変化のない領域であり、輝度をもつ明るい領域は応力に変化の生じた領域となる。初期き裂左下端部からのき裂進展に伴い、応力分布が変化する領域は初期き裂

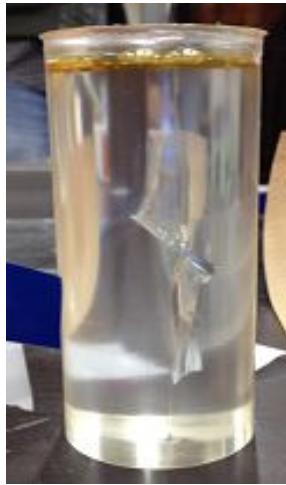
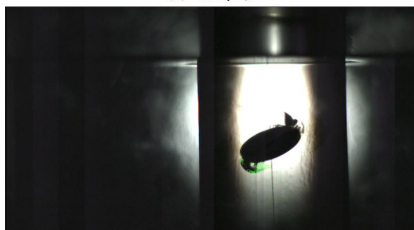


図 4 圧縮荷重載荷後の供試体



(a) 251  $\mu$ 秒



(b) 264  $\mu$ 秒

図 5 3次元内部き裂進展状況  
(撮影速度：33万fps)

左端部を中心として半円状に広がり、初期き裂上側では応力分布の変化が小さい。応力分布に変化が生じた領域の境界を応力波の先端位置とすると、応力波の伝播速度は1,250m/sであった。初期き裂左下端部から供試体右境界面に反射して初期き裂右上端部に達する応力波の伝播経路を想定すると、この経路上の到達距離は52.11mmであり、応力波がこの経路上を伝播して初期き裂右上端部に到達するために要する時間は41.5 $\mu$ 秒となる。初期き裂両端部からのき裂進展開始時刻の差は40 $\mu$ 秒であり、時間分解能が4 $\mu$ 秒であることを考慮すれば、両者はほぼ一致しているといえる。この検討から、遅れて進展を開始するき裂の進展開始には、先に進展を開始したき裂の進展により発生した応力波が影響していると考えられる。

[3次元き裂進展結果]

2枚のアルミ製円盤間にグリースを挟み込んだ初期欠陥を含む供試体に105kNまで載荷した圧縮試験後の供試体を図4に示す。載荷荷重50.2kNで初期欠陥上端部からき裂の進展が開始し、64.8kNで欠陥下端部からもき



図 6 解析結果

裂の進展が開始した。初期欠陥から進展を開始したき裂は進展と停止を繰り返しながら供試体中を進展した。

64.8kNで初期欠陥下端部から進展を開始したき裂の進展状況を超高速ビデオカメラで画像計測した結果を図5に示す。撮影速度は毎秒33万枚とした。下端部中央から進展を開始したき裂が半円状に進展していく過程を確認することができた。

[き裂進展解析結果]

数値解析については、東京大学地震研究所 Maddegadara Lalith 准教授との共同研究として実施した。PDS法に接触アルゴリズムを組み込み、3次元圧縮荷重下でのき裂進展解析に適用した結果を図6に示す。解析結果は実験結果と定性的な一致を示しており、精度の良い解析が可能である可能性が示された。

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 3 件)

L.L.Wijeratne, M.Hori, T.Okinaka, H.Sakaguchi, Application of PDS-FEM for Simulation 3D Wing Crack, Applied Mechanics and Materials, in press, 2013, 査読有

Takeharu G. Etoh, Dung H. Nguyen, Son V.T. Dao, Cuong L. Vo, Masatoshi Tanaka, Kohsei Takehara, Tomoo Okinaka 他, A

16Mfps165kpixel Backside Illuminated  
CCD , Proc. of 2011 International  
Solid-State Circuits Conference,  
406-408, 2011, 査読有  
沖中知雄, き裂の不安定成長問題への  
X-FEM の適用, 応用力学論文集, Vol.13,  
PP.133-140, 2010, 査読有

[学会発表](計 0 件)

## 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

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