

静的載荷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

Visualization of stress field around the propagating crack tip
under the static loading with an ultra-high-speed camera

沖中知雄*・パペル・カリモフ**・江藤剛治***

Tomoo OKINAKA, Pavel KARIMOV and Takeharu ETOH

*Ph.D. 近畿大学講師, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

** Ph.D. 近畿大学研究員, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

***工博 近畿大学教授, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

The stress field around the propagating crack tip under the static loading is visualized. An ultra high speed camera of 1Mfps (Million frames per second) is applied to visualize the stress field around the crack tip by means of conventional photo-elastic imaging technique. A new video trigger system is also developed to detect the initiation of the crack propagation. As a result, it is revealed that the elastic wave, propagating in the specimen, has a significant effect on the crack propagation behavior.

Key Words: crack propagation, photo-elasticity, ultra-high-speed camera, video trigger

キーワード: 亀裂進展, 光弾性, 超高速ビデオカメラ, 画像トリガー

1. はじめに

本研究の目的は, 静的な載荷下で進展を開始する亀裂の先端部近傍における応力場を可視化し, 応力場の挙動と亀裂進展挙動を明らかにすることである。毎秒 100 万枚撮影可能な超高速ビデオカメラと光弾性実験装置を組み合わせ, 亀裂の進展開始から停止までの亀裂先端部近傍の応力分布の変化をマイクロ秒単位で可視化する。

亀裂の進展問題は強振動時の構造物の破壊, 地震発生時の断層のずれ等において重要な問題であり, 既に多くの研究が行われている。数値解析を用いた研究では X-FEM⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, 有限被覆法⁴⁾, FEM- β 法⁵⁾等が提案され, 不連続面を取り込んだ解析が行われている。

実験的な研究では, Rosakis 等⁶⁾, Xia 等⁷⁾⁽⁸⁾が衝撃荷重下で高速で進展する亀裂とその近傍の応力場の可視化を行った。西岡等⁹⁾は静的な不等分布荷重下で進展するモード I 亀裂の進展速度を計測した。Rosakis や西岡等はせん断波の 7 割という従来亀裂進展速度の上限とされていた値を超える亀裂進展速度を計測している。またコースティック法により, 供試体中を進展する亀裂の動的応力拡大係数や J 積分を求める研究も行われている。⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

しかしながら, 衝撃荷重を用いた場合には荷重そのものによる応力場の乱れが生じるため, 亀裂近傍の応力場の計測には適さない。Xia 等⁷⁾はワイヤー爆発による衝撃載荷を利用した。これは断層中の局所的な圧力の解放をモデル化

したためであるが, 同時に Xia 等は衝撃載荷以外の載荷方法では 50 μ s 以下で進行する現象を高速撮影により可視化することが困難であることにも言及している。これは超高速ビデオカメラでは記録可能な画像枚数が限定されるため, カメラによる記録のタイミングと現象の発生タイミングを同期させる必要があるが, 衝撃載荷のように現象の発生タイミングをコントロールしやすい載荷方法以外ではこの同期が困難なためである。

そこで本研究では今まで困難とされてきた静的な載荷下で進展を開始する亀裂の先端部近傍における応力場を可視化することを試みた。超高速ビデオカメラにより亀裂の進展挙動を記録すると共に, 応力場の変化を光弾性実験による干渉縞の変化として可視化する。

毎秒 100 万枚連続上書き撮影可能な超高速デジタル・ビデオカメラ (以下 ISIS カメラ) が 2001 年に江藤等⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾によって開発された。ISIS カメラに使用されている撮像素子は画素周辺記録型撮像素子と呼ばれる素子で, 各画素は光電変換部周辺に 103 個 CCD メモリーを備えている。画像撮影中には撮影された画像は CCD メモリー部末尾のドレインから順次排出され, メモリー部に常に最新の 103 枚の画像情報が記録される。この機能により, 撮影対象の現象の発生を感知して撮影を停止することで現象を記録することが可能となった。このメカニズムは連続上書き機能とよばれ, 現象の発生前に同期を図る必要がある従来の超高速ビデオカメラと比べ, 撮影タイミングと現象の発生タイミ

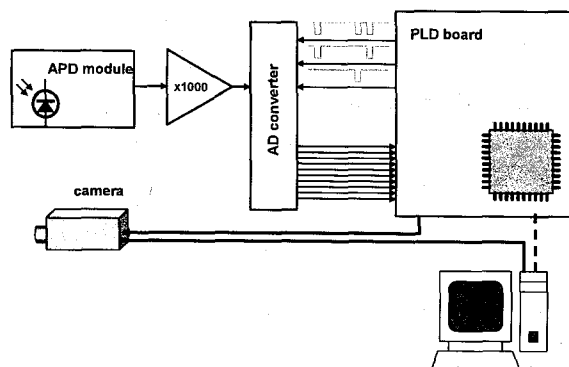


図-1 画像トリガーの構成図

ングの同期を図ることを容易にした。

ISIS カメラの欠点は撮影枚数が 103 枚と比較的少ないことである。連続書き機能を使用しても、毎秒 100 万枚の撮影速度での撮影時には、103 枚の記録画像の中に現象の始点から終点までを収めることは困難である。

そこで本研究ではまず、高感度で安定した画像トリガーの開発を目指した。撮影対象領域の平均輝度を連続的にモニターし、スペckル・ノイズ等の撮影中に発生するノイズと現象の発生を区別して安定的かつ高速に動作するトリガーの開発を目指した。

次に開発されたトリガーを光弾性試験に適用し、応力場の可視化を試みた。初期亀裂を持つ矩形供試体を 3 点曲げ試験で破断させ、進展する亀裂と亀裂先端部近傍の応力分布を干渉縞として撮影した。

2. 画像トリガー

2.1 画像トリガー開発の背景

高速撮影カメラでは撮影枚数が限られる。特に ISIS カメラでは撮影可能枚数は 103 枚である。限定された記録枚数の中に対象となる現象の開始から終了までを記録するためには、適切な撮影速度を選択すると共に、カメラの撮影タイミングと現象の発生タイミングを同期させることが必要となる。衝撃载荷のように現象の発生するタイミングを人為的にコントロールすることが可能な場合には同期は比較的容易であるが、静的载荷下での亀裂進展問題に代表されるように、一般的な問題では現象の発生タイミングをコントロールできない。そのため同期撮影には困難が伴う。

上書き機能を持たないカメラの場合、現象の発生直前にカメラの撮影を開始することで同期を図る必要がある。一方 ISIS カメラは連続書き機能を持つため、現象の発生を感知し、撮影を停止することにより同期を図ることが可能である。この際に用いられる、現象を感知してカメラに撮影停止信号を出力する装置をトリガーと総称する。ISIS カメラで安定した撮影を行うためには、高感度で確実に現象を感知し、高速で動作するトリガーの構築が必要となる。

既存のトリガーには様々な信号が利用されている。亀裂の進展の撮影に際しては音トリガーや遮断トリガーが多く

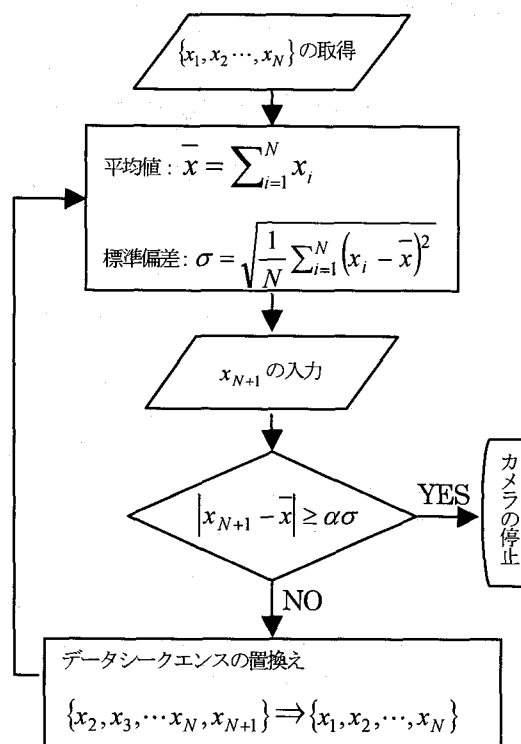


図-2 画像トリガーのアルゴリズム

利用されてきた。音トリガーは亀裂の進展に伴って発生する音をマイクで感知し、亀裂の進展開始を検出するトリガーである。比較的簡便に利用できるがノイズを拾いやすく、また反応速度が遅いため毎秒 100 万枚に達する撮影速度での撮影には適さない。遮断トリガーは予測される亀裂進展経路を横切るように導電体を添付して通電し、亀裂の進展による導電体の断線を感じて亀裂の進展を検出するトリガーである。安定かつ高速であるが、予め亀裂の進展経路が予測できない場合には適用できず、また導電体を添付することから光弾性試験等の透過光を用いた実験には適さない。

このため本研究では、高感度で安定した画像トリガーの開発を目指す。光学実験では観測対象の現象の発生が観測光に何らかの影響を与えることが期待できる。本研究で使用する光弾性実験を例にとれば、亀裂の進展開始は干渉縞の分布に急激な変化をもたらす。このことから、観測光の変化を光学素子で検出することにより、現象の発生を感知するトリガーの作成を試みた。

2.2 画像トリガーの構成

開発されたトリガーの概念図を図-1に示す。トリガーは光学センサー、アンプ、ローパスフィルター、AD コンバーター、PLD (プログラマブル・ロジック・デバイス) ボードにより構成されている。

光学センサーとして浜松フォトニクス社製の APD (アバランシェ・フォト・ダイオード) C5331-11 を採用した。受光面サイズは直径 5mm の円形、感度波長範囲は 200～1,000nm、最大感度波長は 620nm、周波数帯域は 0.004～

100MHzである。受光面への入射光はその強度に比例したAC信号に変換され出力される。今回設計されたセンサーへの入射光は可視光である。また亀裂進展のように入射光が急激に変化する現象への適用を想定している。その目的のためには、今回採用されたC5331-11は感度波長範囲、周波数帯域ともに十分な能力を有している。

光学センサーから出力されたAC信号はアンプとローパスフィルターにより、信号中の高周波成分が増幅されてADコンバーターに入力される。ADコンバーターは入力されたAC信号を3μs毎に離散化し、DC信号として出力する。出力されたDC信号はPLDボードに入力され、次に示すアルゴリズムに従ってモニターされる。

2.3 画像トリガーのアルゴリズム

PLDボード上のプログラムのフローチャートを図-2に示す。ボードへの入力データはADコンバーターにより離散化されたデータである。ボード上では最新のN個のデータからなるデータセットが保存される。データセットの平均値と標準偏差が計算され、標準偏差に係数αを乗じた値が閾値として設定される。

新たなデータが入力されると、入力されたデータと既存のデータセットの平均値との差が求められる。差の絶対値が閾値より小さい場合には現象が未発生と判断される。データセットのうち最も古いデータが破棄され、入力データを新たに含めたN個のデータのセットが再設定される。新たなデータセットの平均値、標準偏差、閾値が再計算され、次のデータの入力を待つ。

一方、差の絶対値が閾値より大きければ現象が発生したと判断され、ボードはカメラに向けて撮影停止信号を出力する。

亀裂進展問題への適用では、データセットのデータ数N=1024、閾値の係数α=2.4と設定した。この条件下で現象の発生から停止信号の出力までの所要時間は最大20μsとなり、毎秒100万枚の撮影速度での撮影への適用に十分な迅速性を確保できた。

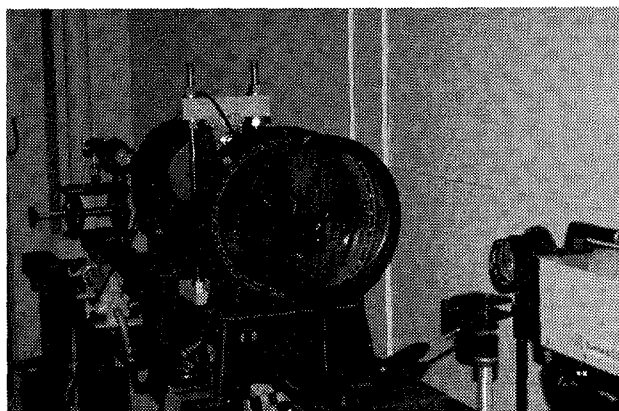


図-3 光弾性実験装置

表-1 エポキシ樹脂 (PSM-9) の物性値

Young's modulus	3.3Gpa
Poisson's ratio	0.38
Density	1,160kg/m ³

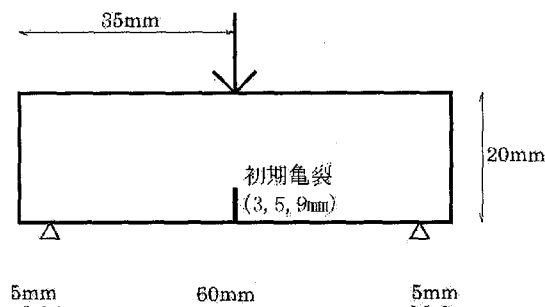


図-4 供試体概要図

3. 進展亀裂先端部での応力場の計測

3.1 実験概要

超高速ビデオカメラと光弾性実験装置を組み合わせ、静的荷重下で不安定成長する亀裂先端部近傍での応力分布の可視化を試みた。使用した光弾性実験装置の概要を図-3に示す。光源として波長532nmのYAGレーザーを使用した。またビームスプリッターをカメラの直前に設置し、観測光の5%を反射させ、反射光を画像トリガーでモニターした。これは亀裂進展を検出して撮影タイミングと現象の発生タイミングの同期を図るためである。

実験には3点曲げ試験を採用した。エポキシ樹脂 (PSM-9) を用いて作成した初期亀裂を含む矩形供試体に静的に荷重し、初期亀裂から亀裂を不安定成長させてその成長過程を超高速ビデオカメラにより撮影した。光弾性試験により供試体中には主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) に依存した干渉縞が生じる。荷重により供試体中に生じた干渉縞パターンが、亀裂の進展に伴って変化する様子を超高速ビデオカメラで撮影することにより、内部の応力分布の可視化を試みた。実験に使用した供試体の概要を図-4に示す。矩形供試体の下辺中央部に3.59mmのスリットをバンドソーを用いて作りこみ、初期亀裂とした。作成材料PSM-9の物性を表-1に示す。

3.2 進展開始直前の亀裂先端部近傍の応力分布

静的荷重下で、主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ は応力拡大係数 K_I を用いて、

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \theta \quad (1)$$

として与えられる。ここでrは亀裂先端からの距離、θは亀裂面方向からの角度である。

光弾性によって得られる干渉縞の縞次数Nは

$$N = \alpha t (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

となる。ここで α は光弾性感度、 t は供試体の厚さである。
式(2)に式(1)を代入することにより

$$N = \alpha t \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin\theta \quad (3)$$

が得られる。

初期亀裂 5mm の供試体中の、亀裂進展直前における干渉縞分布を図-5 に示す。図-5 の画像中で亀裂直角方向への干渉縞の分布から干渉縞の縞次数 N と縞中心の亀裂先端からの距離 r を読み取れば、式(3)から亀裂進展開始時の応力拡大係数 K_{IC} が得られる。同様に求めて求めた初期亀裂 3mm, 5mm, 9mm の各供試体中で得られた K_{IC} の値を表

-2 に示す。 K_{IC} の平均 $92.1 \text{ Nmm}^{3/2}$ で初期亀裂の長さに関わらず、安定した結果が得られた。初期亀裂 3mm の場合のみ値にずれが生じているが、これは画像が粗かったため縞の読み取りに誤差が生じたためと思われる。

3.3 進展亀裂先端部近傍の応力場

実験により撮影された亀裂進展過程と亀裂進展による干渉縞分布の変化を本文末尾に掲載した図-6 に示す。図中には初期亀裂 5mm の供試体中の亀裂進展を毎秒 100 万枚の撮影速度で撮影した 103 枚の画像のうち、 $17 \mu\text{s}$ 以降の 24 枚の画像を抜き出している。ここで時刻は 1 枚目の画像を時刻 0 と設定し、以降の画像に $1 \mu\text{s}$ 毎の時刻を設定している。

時刻 $26 \mu\text{s}$ で亀裂の進展開始が視認できる。それに対し、亀裂先端部近傍の干渉縞は亀裂進展開始に先立つ $18 \mu\text{s}$ から動き始める。亀裂先端部から円状に波の進展していく様子が観察できる。時刻 $20 \mu\text{s}$ で亀裂先端部近傍の縞次数が下がり始め、主応力差の緩和傾向を示す。その後亀裂は時刻 $26 \mu\text{s}$ から進展を開始し、時刻 $36 \mu\text{s}$ まで比較的高速で進展する。この間、進展亀裂先端部近傍の干渉縞縞次数は

表 - 2 画像から決定した K_{IC}

初期亀裂長さ	3mm	5mm	9mm
$K_{IC} \left(\text{N} / \text{mm}^{3/2} \right)$	65.61	92.63	97.51
		99.55	104.98



図 - 5 亀裂進展開始寸前の干渉縞分布
(初期亀裂 5mm)

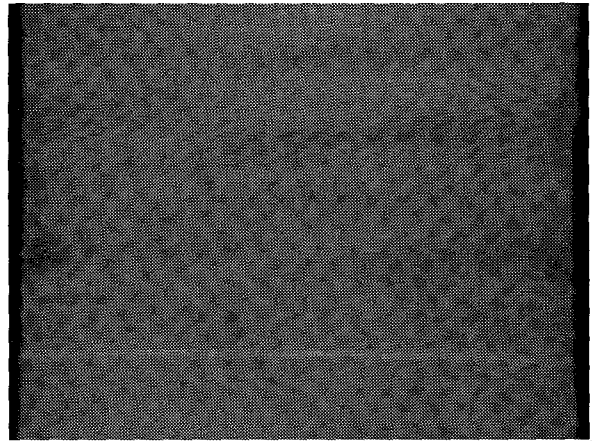


図 - 7 供試体破断面の顕微鏡写真 (拡大率 22 倍)

進展開始直前の縞次数と大きな変化はみせない。時刻 $36 \mu\text{s}$ で亀裂の進展速度が大きく低下する。亀裂の停留中にも応力は変動し、先端部近傍で縞次数が上昇し、またその間隔が密になる。その後 $38 \mu\text{s}$ に亀裂は再び進展を開始して破断に至る。

コースティック法を用いた既往の研究では亀裂の進展開始と共に応力拡大係数が低減することが報告されており、本試験における干渉縞の縞次数の低下と傾向の一致を示している。しかしながら、今回の実験結果は応力拡大係数の低下が亀裂の進展開始に先立って発生している結果を示している。破断した供試体の断面写真を図-7 に示す。初期亀裂近傍と表面付近で延性破壊が生じていることが分かる。この領域でのクレイズ成長等が亀裂進展直前の応力集中の緩和に寄与していると考えられるが、より詳細な検討が今後の課題である。

初期亀裂 3mm, 9mm の供試体中の亀裂進展と応力分布の変化を毎秒 100 万枚の撮影速度で撮影した結果を各々図-8, 図-9 とし、本文末尾に示す。5mm の場合と同様に、亀裂進展開始直前に亀裂先端部の縞次数が減少し、その後に亀裂が進展を開始する。進展中の亀裂先端部近傍での縞次数は変化を見せないが、亀裂の進展速度が低下した後に縞次数が上昇し、縞間隔が密になる傾向が読み取れる。

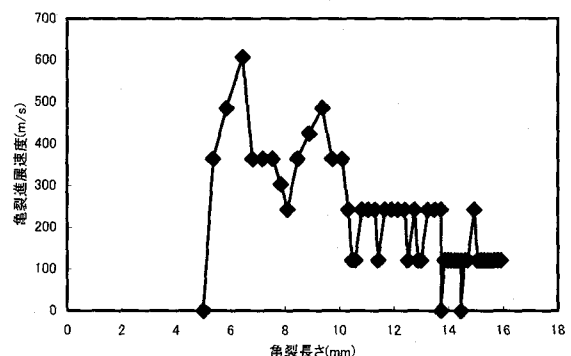


図 - 10 初期亀裂 5mm の供試体中の亀裂進展速度

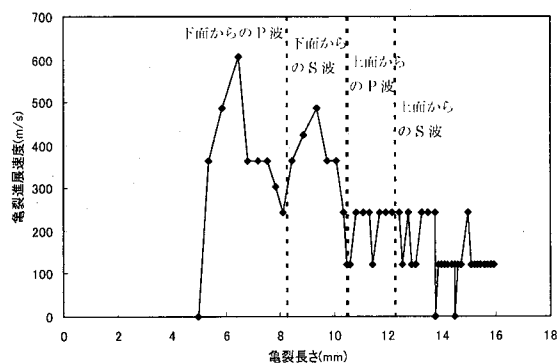


図 - 11 初期亀裂 5mm の供試体中での進展亀裂と弾性波の邂逅点

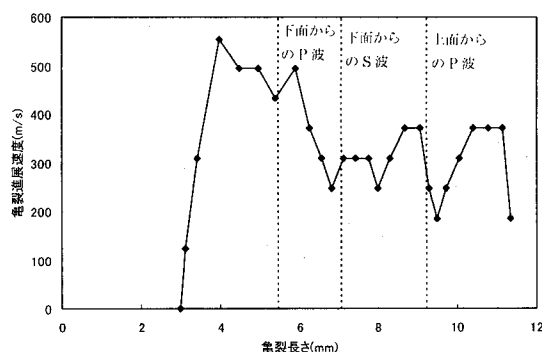
3.4 亀裂進展速度

初期亀裂 5mm の供試体中の亀裂進展過程の撮影結果から亀裂先端位置を読み取り、亀裂の進展速度を求めた結果を図-10 に示す。横軸は亀裂長さ、縦軸は亀裂進展速度である。撮影画像はピクセル単位で記録されるため、ピクセルサイズ以下の亀裂の変動の情報は欠落する。図-6 に示された画像では1ピクセルが0.36mmに対応しており、これ以下の亀裂先端部の位置の変化は読み取れない。このため読み取った亀裂長さが階段状に変化する。そこで前後3枚(前後1 μ s)の移動平均をとることにより、読み取り結果の平滑化を試みた。

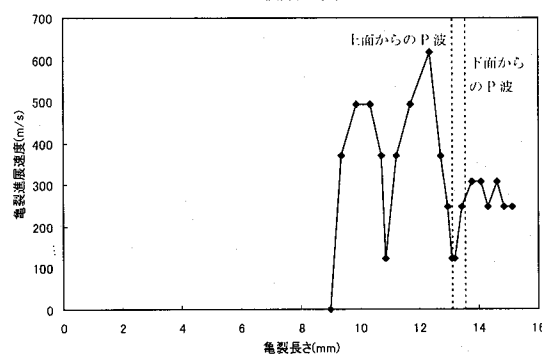
亀裂の進展速度は進展開始直後に最大の606m/sに達する。エポキシ樹脂中のせん断波の伝播速度は1,016m/sであり、進展速度の最大値はせん断波の6割に達している。亀裂の進展速度の上限は一般的にせん断波の7割とされており、亀裂の進展開始直後に最大値に近い速度で進展を開始していることが分かる。亀裂進展速度はその後低減し、進展速度が振動を繰り返しながら亀裂は進展する。

亀裂の進展によってエネルギーが解放され、供試体中を弾性波として伝播する。エポキシ樹脂中のP波とS波の伝播速度は各々1,690m/s, 1,017m/sである。伝播した弾性波は供試体境界で反射し、亀裂方向へ戻ってくる。この弾性波と進展亀裂先端部が邂逅する亀裂長さを求め、亀裂長さ - 亀裂進展速度の図に併記したものを図-11 に示す。下面で反射したP波、下面で反射したS波、上面で反射したP波、上面で反射したS波は、各々亀裂長さ8.24mm, 10.48mm, 10.51mm, 12.24mmの亀裂長さの時に亀裂先端部と邂逅している。図11に示す通り、これらの邂逅点と亀裂進展速度が低下する点とが非常によく一致している。特に下面からのS波、上面からのP波が進展亀裂先端部と邂逅する亀裂長さ10.48mmと10.51mmは時刻36 μ sに対応し、前小節で検討した停留亀裂先端部での干渉縞の変化が弾性波によるものであったことが理解される。この検討から、弾性波の伝播が亀裂の進展挙動に大きな影響を与えていることが分かった。

初期亀裂3mm, 9mmの各供試体中での亀裂長さ - 亀裂進展速度、応力波との邂逅点を図-12 に示す。いずれのケースでも進展速度が振動しながら亀裂が進展する。亀裂の



(a) 初期亀裂3mm



(b) 初期亀裂9mm

図 - 12 亀裂進展速度と弾性波との邂逅点

(a) 初期亀裂3mm (b) 初期亀裂9mm

進展速度が低減する点と弾性波が亀裂先端部と邂逅する点は完全には一致していないが十分に近接しており、何れのケースでも弾性波の進展が亀裂の進展速度に影響を与えていると推論付けられる。しかしながら亀裂速度が低下する全ての点が反射P,S波と関連付けられてはならず、従って他の影響因子の存在を検討する必要がある。

4. 結論

本研究では超高速ビデオカメラと光弾性試験を組み合わせ、静的載荷下で進展を開始する亀裂先端部近傍の応力場の可視化と亀裂進展挙動の検討を行った。また超高速ビデオカメラに適用する画像トリガーを開発した。得られた結論は以下の通りである：

- (1) 毎秒100万枚撮影可能な超高速ビデオカメラと光弾性試験を組み合わせ、今まで困難とされてきた静的載荷下で進展する亀裂先端部近傍の応力場を可視化することに成功した。
- (2) 超高速ビデオカメラに使用する画像トリガーを開発した。画像トリガーは毎秒100万枚での撮影に十分な反応速度と高い信頼性を示した。
- (3) 亀裂の進展挙動に、亀裂の進展により解放された弾性波が大きな影響を与えていることが分かった。弾性波との邂逅により亀裂の進展速度が低下することが撮影された画像から読み取れた。



図-6 初期亀裂 5mm の供試体中での亀裂進展と進展に伴う応力分布の変化. 毎秒 100 万枚で撮影した 103 枚の画像のうち 17 μ s 以降の 24 枚を抜き出している.



図 - 8 初期亀裂3mmの供試体中での亀裂進展と進展に伴う応力分布の変化. 毎秒100万枚で撮影した画像から, 34 μ s以降の24枚を抜き出している.



図 - 9 初期亀裂9mmの供試体中での亀裂進展と進展に伴う応力分布の変化. 毎秒100万枚で撮影した画像から, $12\mu s$ 以降の24枚を抜き出している.

参考文献

- 1) Belytschko, T. and Black, T.: Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, Int. J. Numer. Meth. Engrg., Vol.40, pp.1483-1504, 1999
- 2) Moes, N, Dolbow, J. and Belytschko, T.: A finite element method for crack growth without remeshing, Int. J. Numer. Meth. Engrg., Vol.46, pp.131-150, 1999
- 3) Budyn, E., Zi, G., Moes N. and Belytschko T.: A method for multiple crack growth in brittle materials without remeshing, Int. J. Numer. Meth. Engrg., Vol.61, pp.1741-1770, 2004
- 4) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 久田真: 鉄筋の腐食膨張のモデル化とコンクリートのひび割れ挙動の数値, 土木学会論文集A, Vol.63, pp.167-178, 2007
- 5) 岩井俊英, 小国健二, 堀宗朗: FEM- β 一破壊現象の解析に適したFEM, 応用力学論文集, Vol.6, pp.231-238, 2003
- 6) Rosakis, A.J., Samudrala and O., Coker, D.: Cracks faster than the shear wave speed, Science, Vol.284, pp.1337-1340, 1999
- 7) Xia, K., Rosakis and A.J., Kanmori, H.: Laboratory Earthquakes: The sub-Rayleigh-to supershear rupture transition, Science, Vol.303, pp.1859-1861, 2004
- 8) Xia, K., Rosakis, A.J., Kanamori H. and Rice, J.R.: Laboratory earthquakes along inhomogeneous faults: Directionality and supershear, Science, Vol.308, pp.681-684, 2005
- 9) Nishioka, T., Sakaguchi, Y., Fujimoto, T. and Sakakura, K.: Experimental study on limiting fracture velocities in homogeneous materials, Symposium on Recent Advances in Dynamic Failure and Fracture Studies, The 2003 Society for Experimental Mechanics Annual Conference, June 2-4, 2003, Charlotte, North Carolina, USA
- 10) 清水紘治, 末次正寛, 中村忠史, 高橋賞: コースティック法による集中荷重の評価と光学定数の測定への応用, 機械学会論文集 (A 編), Vol.63, pp.87-93, 1997
- 11) 野口敏生, 江角務: コースティック法による相互作用き裂の動的干渉効果に関する研究, 高速撮影とフォトリソグラフィに関する総合シンポジウム 2003 講演論文集, pp.11-14, 2003
- 12) 横井健一, 遠藤正人, 江角務: ポリカーボネートのクレイズ成長および亀裂進展挙動に関する実験的検討, 機械学会論文集 (A 編), Vol.72, pp.1690-1696, 2007
- 13) T. Etoh, D. Poggemann *et al.*: An image sensor which captures 100 consecutive frames at 1000000 frames/s, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.50(1), 144-151, 2003
- 14) T. Etoh, D. Poggemann *et al.*: A CCD image sensor of 1Mframes/s for continuous image capturing of 103 frames, Proc. 2002 ISSCC, 46-48

(2007年4月12日 受付)