

動光弾性実験による脆性はりの 衝撃破壊過程の可視化

VISUALIZATION OF FRACTURE PROCESS BY DYNAMIC PHOTOELASTICITY
FOR BRITTLE BEAM SUBJECTED TO LATERAL IMPACT LOAD

佐藤 誠*

by Makoto SATO

The purpose of this paper is to present one of the method to visualize the crack propagation process of a brittle beam subjected to lateral impact load. To visualize the fracture phenomena for impact loading, is very important technics to comprehend the mechanism of fracture and impact response.

The experiment was performed using the transverse impact by a steel weight on the simply supported or fixed beams made of epoxy resin. The mechanism and the process of the fracture were photographed by a dynamic photoelasticity combining the static photoelasticity with Cranz-Schardin type multi-flash device.

It was shown that the crack propagated the beam from bottom to upperside vertically in a notched beam model, but in a no-notched beam model the crack propagated vertically with low velocity and after the crack tip arrived at the upperside of beam another crack branched off toward beam axis and propagated with higher velocity.

1. はじめに

衝撃的な外力を受けるはりまたはラーメンなどの骨組み構造物の波動応答については、解析的ならびに実験的にすでに多くの研究がなされている^{1) 2)}。しかし、この問題に関連して、衝撃力による破壊現象はいまだ十分究明されているとはいえず、現在種々の実用的な観点から研究が続けられている。たとえば、衝撃速度で分類すると、比較的低速度の衝撃については、落石覆工（ロックシェッド）に対する落石衝撃、砂防ダム、砂防施設に対する土石流中の巨石による衝撃およびガードレールへの車の衝撃など、また、高速度の衝撃については、高速飛行体（ジェット機など）が原子炉のような重要施設に落下する場合などが研究対象となっている。

これらに対する安全性の検討は依然として研究途上にあり、いずれも衝撃力の伝播挙動および破壊メカニズムの問題または衝撃エネルギーの吸収能の問題として解析的、実験的に究明されつつある。特に、衝撃応答および衝撃破壊の問題は重要かつ切実な問題であり、被衝撃体への衝撃力、衝撃力の伝播状態、破壊過程および衝撃時の材料性質の推定など困難な問題が残されている。

一般の衝撃問題において、衝撃を受けた構造物の損傷や破壊は、部材内部を伝播する応力波の反射と干渉などによる複雑な応力状態のもとで発生するため、破壊の発生形態が静的荷重によるものと異なると予想される³⁾。また、時間因子を含んだ材料特性も考慮しなければならないために、理論的解析も容易ではない。一方、衝撃による破壊の刻々の過程を実験的に追跡することは、衝撃破壊現象の理解と解明に極めて有効で

*工博 広島大学 助教授 工学部第四類（建設系）（〒724 東広島市鏡山1-4-1）

あると考えられる。しかし、たとえば、破壊に伴うき裂先端は Rayleigh 波の伝播速度近くで移動する場合があります。波動挙動を含めてこれを実験的に測定することは困難な場合が多い。

その意味で、注目する領域全体についての波動応答と破壊挙動現象の刻々の状態を可視化できる動光弾性実験法⁴⁾は、波動応答および破壊挙動の解明に極めて有効である。

ここでは、動光弾性実験によって衝撃による破壊過程を究明するために、上記の諸問題における対象構造を単純化し、被衝撃体の衝撃応答を波動伝播問題として考え、実験的に被衝撃体内全体の波動現象および破壊過程を可視化し、可視化された画像をもとに応答を効果的に解析できることを示す。

まず、被衝撃体の基本構造部材として脆性はりを考え、落錘により横衝撃集中荷重を受ける長方形断面はりを対象にして動光弾性実験を行ない、はり内の衝撃力の伝播および破壊過程を視覚化する。

なお、一般に、境界を有する固体には、縦波、横波、表面波および head wave が伝播する⁵⁾。たとえば、横衝撃されたはりにおけるそれらの波動は、支点到到達する以前であっても伝播につれて反射波が重ね合わされ、曲げ波を形成するなど極めて複雑である。また、通常の 2 次元動光弾性実験で得られるこれら波動による等色線縞模様（主応力差 $(2\tau_{MAX})$ の等高線を意味する）をモノクロ撮影すると、縞次数（ τ_{MAX} の大きさ）の判読が困難となる場合が多い。本研究では、波動による等色線縞模様をカラー写真として撮影し、複雑な等色線縞次数の増減を的確に判断できる一層有効な可視化を行なう。

2. 動光弾性実験装置

本研究で用いた動光弾性実験装置のシステムを図-1 に示す。光弾性光学系は基本的には、通常の静的実験に用いられる 2 次元光弾性装置であり、これに高速現象の撮影ができるように衝撃載荷装置（荷重系）、光源（光源系）、撮影カメラ装置（撮影系）および光源制御装置（トリガー系）を付加したものである。

高速現象を撮影するには、ドラムとミラーを組み合わせた高速カメラを用いる場合と、Cranz-Schardin 型の多重閃光光源を用いる場合に大別されるが⁶⁾、ここでは、後者の方式を採用している。

図-1 において、光源系と撮影系には、それぞれ 9 個の Xe フラッシュと 9 個のカメラが配置されており、暗室内で、トリガー系で制御された遅延時間間隔で 9 個のフラッシュが次々に閃光し、視野レンズで対応する焦点位置が調整された 9 個のシャッターを解放したカメラに多重露出にならないように光束が入射される。したがって、一回の衝撃に対して、

1~999 μs の範囲の任意の時間間隔で撮影された 9 駒の写真が得られることになる。なお、Xe フラッシュの閃光時間は約 1 μs である。光源系への最初のトリガーは、落錘衝撃力を衝撃点近傍のはり上縁に設置したひずみゲージから動ひずみ計を経て得るか、または、落錘によりはり上縁に設置した 2 枚のアルミ箔が接点を形成することによって得た。撮影系のカメラはシャッター機構を改良した使い捨てカメラである。以下では、上記の実験法を多重閃光撮影法と呼ぶ。

一方、光源系と撮影系がそれぞれ 1 個のフラッシュと 1 個のカメラで構成された場合は、一回の衝撃で 1 駒の写真しか得られないが、視野レンズを必ずしも必要とせず、ズームレンズまたは望遠レンズなどが自由に使用でき、カメラの性能がよくなるので鮮明な写真が得られる。そのため、衝撃力と応答に再現性が期待できる場合には、トリガーからの遅延時間を変えて繰り返し衝撃することにより、任意時間間隔で必要な

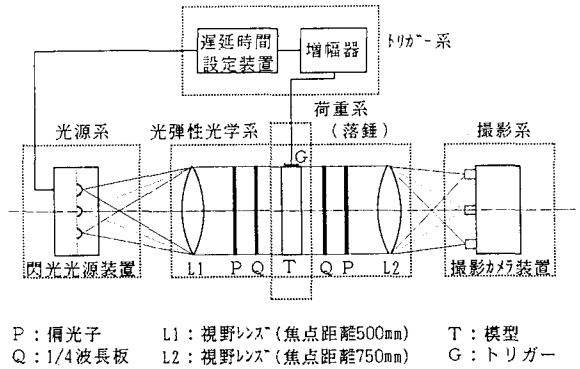


図-1 動光弾性実験のシステム

だけの駒の写真が得られる。以下では、この実験法を繰り返し入力法と呼ぶ⁷⁾。この方式は、単純ではあるが操作が容易であるので、破壊にいたらない弾性範囲でのはり内の波動応答の撮影に採用した。

3. 実験模型と実験方法

実験に使用したはり模型の寸法、支持状態、衝撃位置を図-2に示す。横衝撃による弾性波動伝播現象を撮影するための模型ははり（BAモデル）と衝撃破壊過程を撮影するためのはり模型（BNモデルとBCモデル）を使用している。BNモデルは、BAモデルと同一断面およびスパンで、破壊開始点を一定にするために、衝撃点下縁に切り欠き（深さ5.6mm、幅0.5mm）を設け、BCモデルは、実際のな破壊現象をシミ

ュレートするために切り欠きを設けていない。切り欠きがない場合は、衝撃破壊を起こし易いように、衝撃力を増加しはり断面を小さくしている。

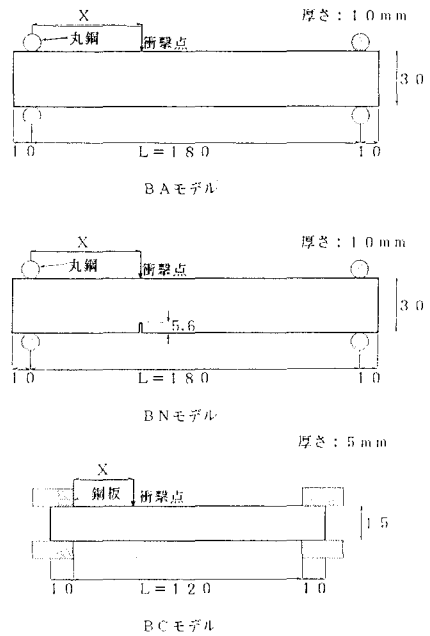


図-2 模型の寸法、支持状態および衝撃位置 単位:mm

なお、模型材料の破壊さ裂の伝播状態を単純な形で可視化するために、長方形板の対称軸の一端にくさび形の切り欠き（深さ10.6mm、上縁での幅6mm）を設け、くさびを挿入して落錘衝撃するための模型（BPモデル）も使用した。

模型は、すべて実験室で鋳型したエポキシ樹脂（アラルダイトB）板から製作し、その材料性質を表-1に示す。また、模型材料の脆性的性質を示すために、単純はりが破断するまで0.5kgf/sで荷重

表-1 模型材料の性質

板内の縦波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	ポアソン比	密度 (t/m ³)
1,950	1,050	0.42	1.22

した静的3点曲げ試験結果を図-3に示す。この結果から、以下では、曲げによる静的終局ひずみを15,000 μ とする。

衝撃荷重は、それぞれのモデルに対して異なるが、鋼球または円筒鋼棒を落錘として自由落下させて与えた。それぞれのモデルに対する落錘質量と衝撃速度を表-2に示す。また、衝撃位置（X）は、はりスパンをLとして、支点からL/6、L/3、L/2の3種類の距離とした。

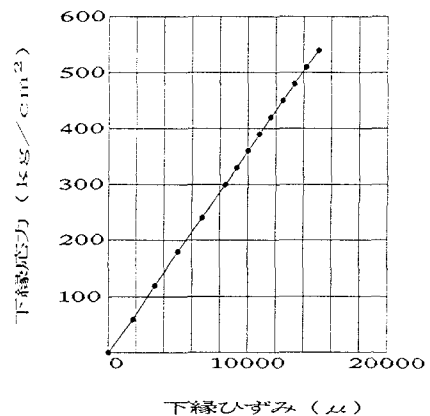


図-3 静的3点曲げ試験結果

本研究では、衝撃力を直接測定するのは困難であることと、また、ロードセルなどを介して衝撃すると、波動的に入・反射波による複雑性が増加することを避けるために、落錘とはり上縁の間に挿入して測定される方式の衝撃パルス形は測定していない。しかし、衝撃パルスの継続時間と波形の目安を得るために、衝撃点下縁（B Nモデルでは切り欠き先端から2mm）ではり軸方向の動ひずみ波形を測定した。

図-4に、衝撃点下縁の動ひずみ波形の例を、B CモデルのL/2を衝撃した場合について示す。ただし、衝撃全体のパルス形を得ることが目的であるから、衝撃破壊が起こらないように、落錘質量を118.9g、衝撃速度を3.8m/sとしている。

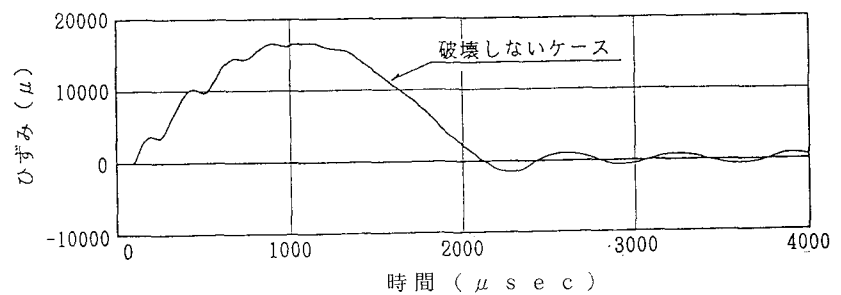


図-4 衝撃点下縁の動ひずみ波形（B Cモデル， $X = L/2$ ）

4. 実験結果と考察

(1) 弾性波動応答（B Aモデル）

写真-1に、B Aモデルを衝撃位置L/3で衝撃した場合の波動伝播挙動を、繰り返し入力法によって撮影した等色線縞模様写真を示す。この実験では、はりの横衝撃による応力波の伝播挙動をできるだけ詳細に可視化して追跡するために、5～10μs毎に撮影したが、ここにはそれらから抜粋して示している。また、表-2に示したように、落錘質量を小さくして、衝撃時間をできるだけ短く、パルス形も単純にしている、こ

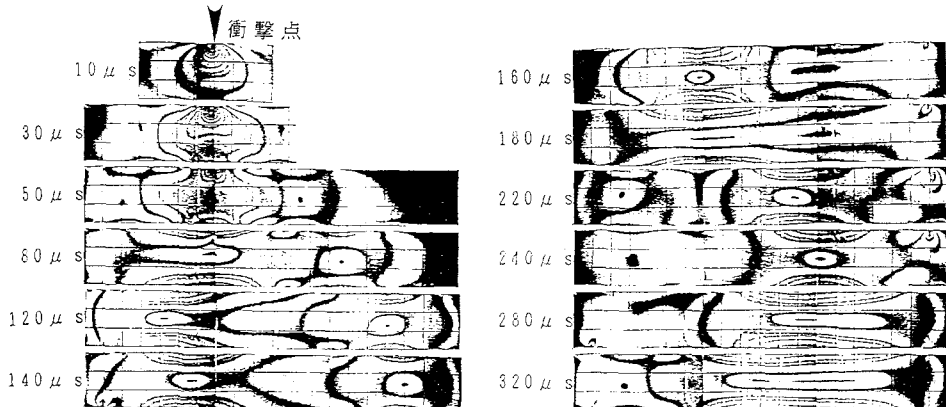


写真-1 B Aモデルの等色線縞模様写真（ $X = L/3$ ）

の場合の衝撃パルス形を写真から読み取ると、立ち上がり時間は約 $80\mu s$ 、継続時間は約 $150\mu s$ である。

写真－１から、横衝撃を受けたはり内には、衝撃初期の縦波と横波による球根状の波面が、下縁と上縁で反射しながら衝撃点近傍から離れるに従って、はり軸方向直応力が、はり軸付近で０、はりの上・下縁で最大となる下に凸の純曲げと同様の応力状態となる部分が生じる。さらに、 $50\mu s$ 以後ははり端に向かっては、前記の曲げと逆の曲率を持つ曲げが生じ、両曲げ区間の間には、純せん断状態と考えられる断面が存在することが分かる。 $140\mu s$ 以後は、曲げ波のはりの右端で反射し、 $220\mu s$ で再びはり中央右寄りの位置に最大曲げ応力の区間が生じている。

したがって、はりのスパンが十分長ければ、上記の互いに逆の曲率を持つ曲げ区間は、はり端に向かって次々に現れ、一つの曲げ区間の平均の伝播速度は一定であっても、次々に発生する曲げ区間の先端の伝播速度は、最短の経路で到達した縦波および横波によって形成されるため、曲げ波の伝播速度より早い。

上記の現象は、はりの衝撃応答としての曲げモードおよび曲げ波と考えた場合の伝播特性が、横衝撃の継続時間とはりの断面２次半径に支配される³⁾ことを説明している。

また、曲げ波がはり端で反射することを考えると、衝撃点からはり端までの距離と純曲げ区間長との関係によっては、最大曲げ応力が発生する断面は必ずしも衝撃点下縁ではなく、本研究の範囲では、はり中央に関して衝撃点と対称な断面であった⁹⁾。

(2) 衝撃破壊過程

以下に示す等色線縞模様写真はすべて多重閃光法によって撮影されたものである。また、各モデルについて6体以上の実験を行ったが、ここにはそれらの代表例を示す。

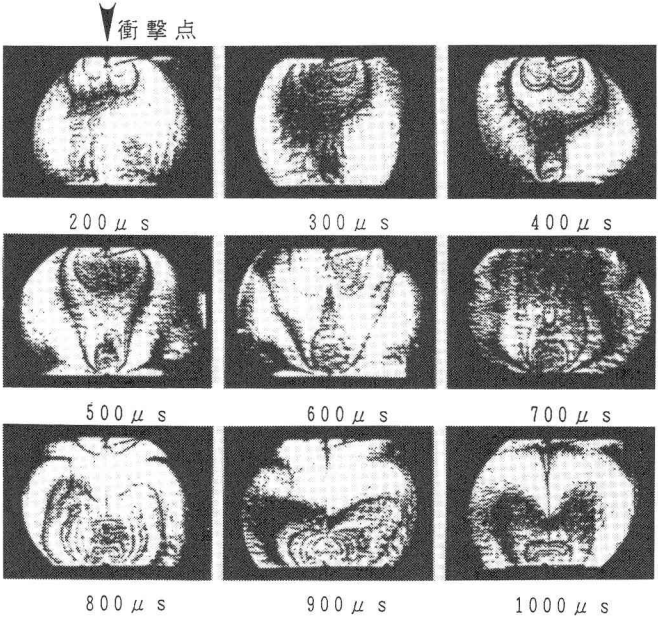
1) B Pモデル

写真－２に、B Pモデルの衝撃破壊によるき裂の進展状態の等色線縞模様写真を示す。また、図－５に、各駒から読み取ったき裂先端の位置を示す。

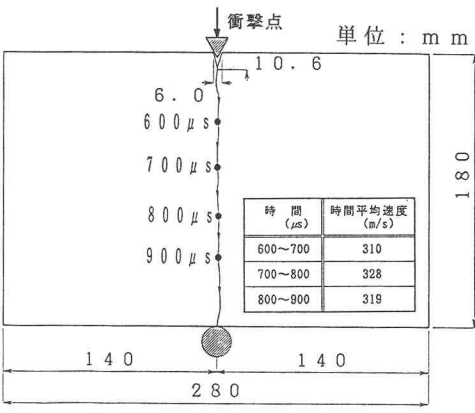
この衝撃においては、板上縁の切り欠き先端から2mmの位置に設置した亀裂軸と直角方向のひずみゲージでトリガーしている。き裂開始は、衝撃力がピークとなる約 $500\mu s$ 以後であり、 $1000\mu s$ にき裂先端が板下端に達している。 $600\mu s$ 以後に、き裂先端を示す特徴ある等色線縞模様が現れている。図中の表に示すように、 $600\sim 900\mu s$ におけるき裂進展速度は各時間間隔ともほぼ一定で、平均進展速度は、横波速度の約32%である。

2) B Nモデル

写真－３(a)，(b)に、それぞれB NモデルのL/3とL/6の位置を衝撃した場合の、衝撃破壊によるき裂



写真－２ B Pモデルの等色線縞模様写真



図－５ B Pモデルのき裂進展状態

の進展状態の等色線縞模様写真を示す。写真-1に比較して写真-3が不鮮明であるのは、現在行っている多重閃光法のカメラの能力が劣っていることと、それに付随してフィルム面上の像が小さく、ここではそれを約10倍に引き延ばし、さらにカラー写真をコピーして示しているためである。

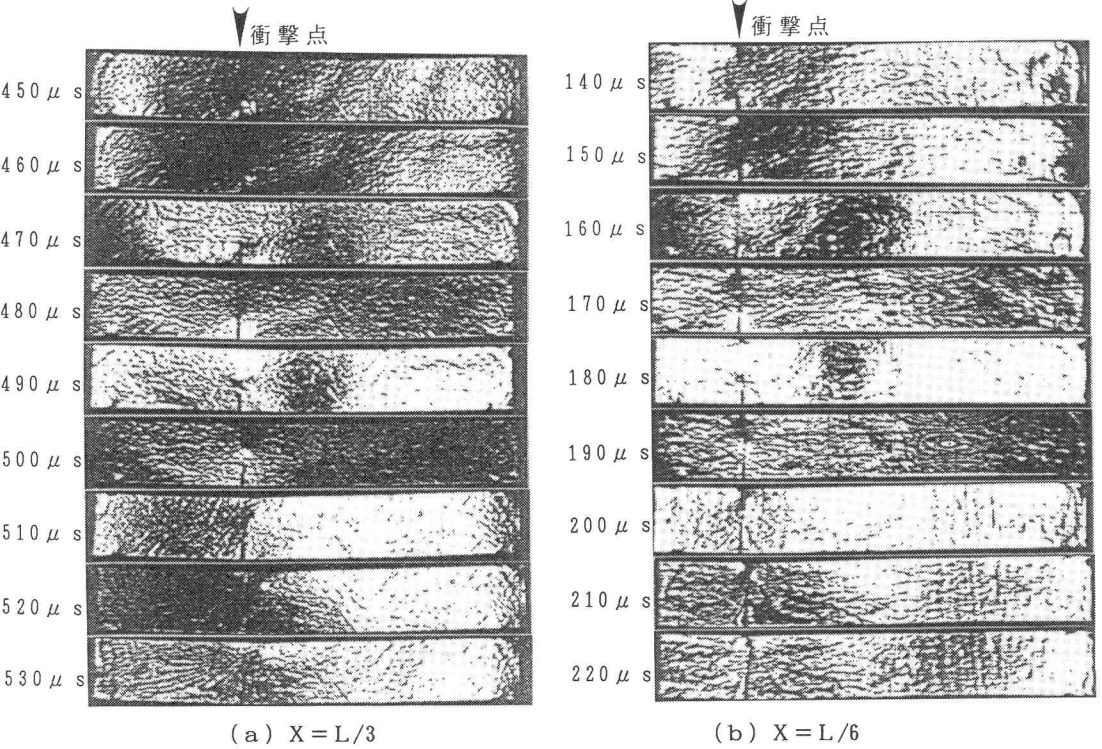


写真-3 BNモデルの等色線縞模様写真

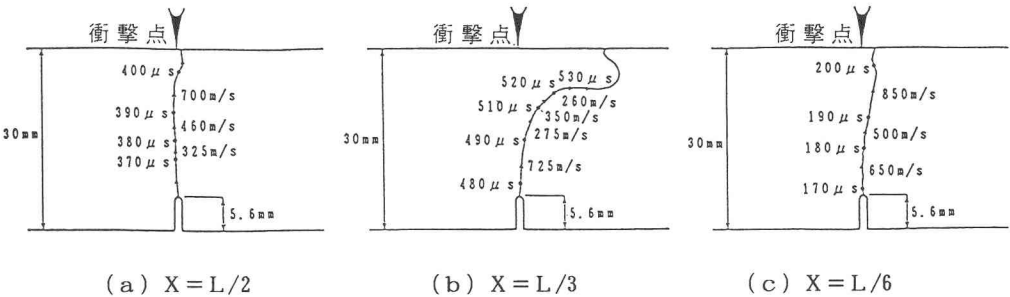


図-6 BNモデルのき裂進展位置と進展速度

図-6 (a) ~ (c) に、それぞれBNモデルの衝撃位置が $L/2$ 、 $L/3$ 、 $L/6$ であるとき、各駒から読み取ったき裂先端の位置と各区間での進展速度を示す。また、図-7に、各衝撃位置に対する切り欠き先端付近のき裂進展開始までの動ひずみ波形を示す。

写真-3 (a) および図-6 (b) によると、470 μ s 付近で切り欠き先端からき裂が発生し、520 μ s 付近まではり中央方向に緩やかに曲がりながら上方へ進展する。その後き裂は急激に進展方向を変え、ほぼはり軸と平行に進展し、最終的にはり上縁に向かって進展して破断する。

き裂の進展速度は、き裂発生後ほぼ直線的に進展する間は約725m/sと大きく、その後、はり中央方向に曲がりながら進展する間は約260m/sまで減速する。

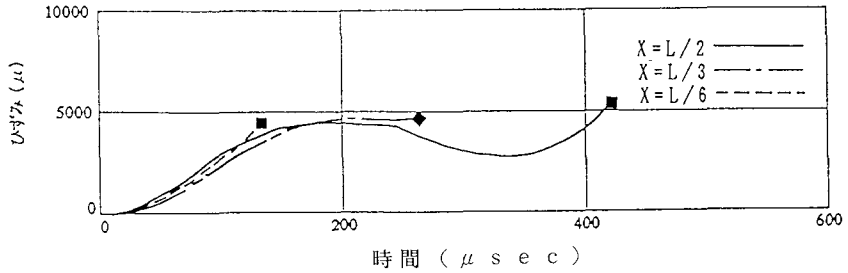


図-7 BNモデルの切り欠き先端の動ひずみ

き裂において、き裂の進展速度が横波速度 (C_T) の 60% を越えると、き裂が左右対称に分岐するとされている¹⁰⁾。上記において、き裂が直線的に進展する場合の進展速度は、横波の約69%であり、進展方向が変化する点では、この理論に従っている。また、図-6 (a), (c) においても、進展方向がわずかに変化する直前の進展速度が最大で、いずれも進展速度は $0.6C_T$ 以上である。

はり内の等色線縞模様写真に注目すると、 $450\mu s \sim 480\mu s$ ではき裂の近傍以外は明らかに上縁が圧縮、下縁が引張となる曲率を持つ曲げの状態であり、その曲げモードの中立軸を意味する暗転がはり高中央に現れている。 $500\mu s \sim 530\mu s$ ではき裂の両側に、き裂の進展によって曲げ応力が解放されたために生じたと考えられる波面が観察され、また、進展中のき裂の先端から次々に発生した表面波と考えられる縞模様も現れている。

衝撃位置が $L/2$ と $L/3$ の場合は、他の実験模型すべてが図-6 と同様な破壊形状となったが、 $L/6$ の場合は、図-6 と同様な破壊形状となるパターンと、切り欠き先端からはり中央方向に緩やかに曲がりながら上縁に達するパターンの2つのパターンが存在した。

図-7 における切り欠き先端付近の動ひずみから、き裂進展開始時間は、切り欠き位置が $L/2$, $L/3$, $L/6$ の順に、それぞれ $420\mu s$, $280\mu s$, $135\mu s$ と早くなっており、切り欠き位置がはり中央から離れるに従って動ひずみが衝撃後の早い時刻に終局ひずみに達している。ただし、終局ひずみに達する時間すなわちき裂進展開始時間は、図-7 の $L/2$ のひずみ波形の場合から分かるように、 $200\mu s$ 付近でも終局ひずみに近い状態があった。したがって、衝撃パルスの立ち上がりが鋭ければ $200\mu s$ 付近でき裂が進展を開始した可能性がある。このことは、曲げ波がはり端で反射して切り欠き位置まで伝播する時間にも関係することを示し、後で述べるBCモデルの場合にも同様の現象が生じている。

一般に、はりの上・下縁のひずみ波形は、図-4 の例で示したように、はり内を波動が往復するため、振動的にいくつかの局所的なピークを持ちながら最大ひずみに達する。そのため、終局ひずみが局所的なピーク付近にある場合には、そのままそのピークでか、または、次の局所的ピークにいたる途中でき裂が発生するかは微妙であり、わずかなひずみの差がき裂開始時間に大きな違いを生ずることがある。本研究の実験のように、限られた時間内(駒数)でき裂の進展状況を観察する場合には、適切なトリガーを設定することに実験上の困難さが伴わざるを得ない。

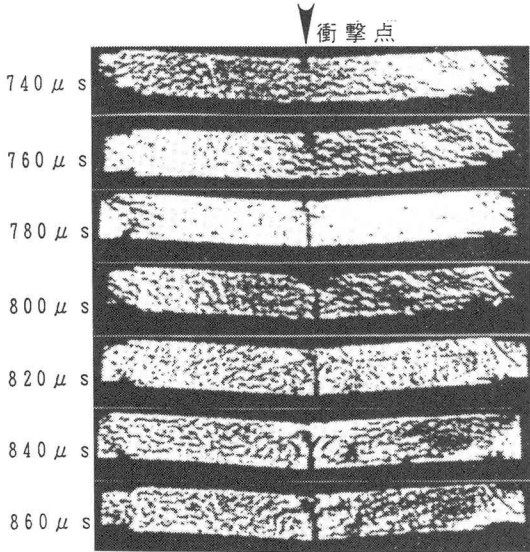
3) BCモデル

写真-4 (a), (b) に、それぞれBCモデルの $L/2$ と $L/6$ の位置を衝撃した場合の、衝撃破壊によるき裂の進展状態の等色線縞模様写真を示す。

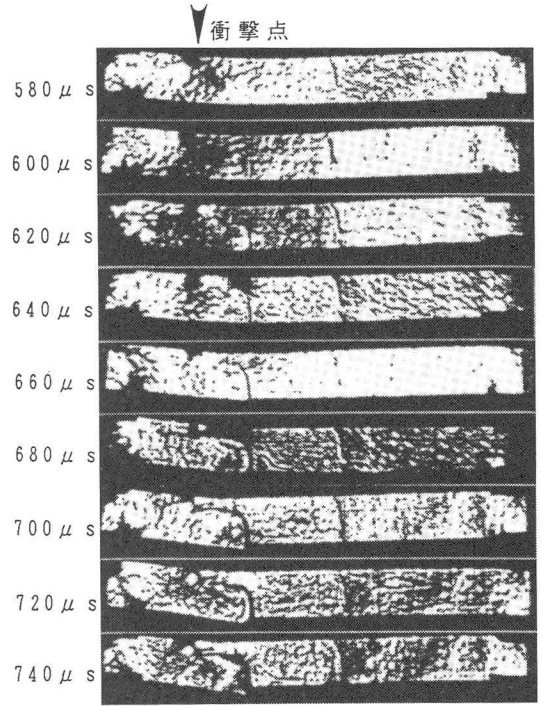
図-8 (a) ~ (c) に、それぞれBCモデルの衝撃位置が $L/2$, $L/3$, $L/6$ であるとき、各駒から読み取ったき裂先端の位置と各区間での進展速度を示す。また、図-9 に、各衝撃位置に対する切り欠き先端付近のき裂進展開始までの動ひずみ波形を示す。

写真-4 (a) と図-8 (a) によると、まず、衝撃点直下のはり下縁から $760\mu s \sim 780\mu s$ の間でき裂が

発生し、き裂ははり上縁に向かってほぼ直線的に進展し、 $800\mu s$ 付近で上縁に到達する。その後、このき裂の途中から左右方向に新たにき裂が発生し、はり軸方向へほぼ左右対称に進展する。この



(a) $X = L/2$



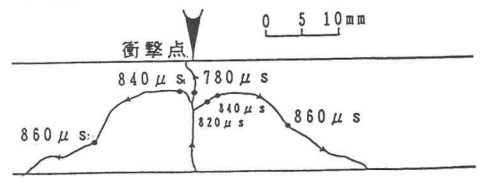
(b) $X = L/6$

写真-4 BCモデルの等色線縞模様写真

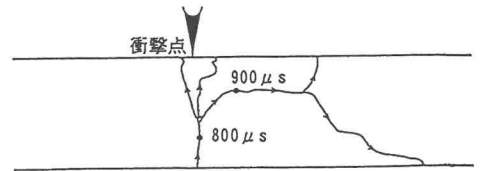
左右方向に発生するき裂については、本実験におけるき裂近傍の縞模様不鮮明であるため、はり内部の応力状態が判断できず、その原因を究明することは困難である。しかし、破壊後の破断面を詳細に観察すると、最初に発生した中央のき裂部分の破断面は微細ではあるが多数の鋭い凹凸が存在する。

なお、はり軸方向にほぼ平行なき裂パターンは、引張強度の低い場合に裏面剥離として生じ得るパターンであるが、本実験の模型材料はそのような材料ではなく、また、破壊発生時刻から考えても裏面剥離とは全く異なる原因で生じたパターンである。

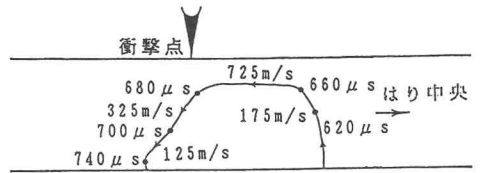
下縁から上縁に達する直線的な破断面は、明らかにモードⅠの破壊によると考えられるが、破壊しない場合の図-4に示した動ひずみ波形を考慮すると、左右方向にき裂が分岐する時刻でも衝撃力は作用していると推定されることから、はり中央の破断面の凹凸の一つに対する破断面近傍のせん断応力による応力集中がきっかけとなり、モードⅡを含む形で左右方向のき裂が発生した可能性がある。ただし、き裂の分岐機構については、分岐点付近の応力状態すなわち動的応力拡大係数^{14) 15)}が解明される必要があり、本実験からだけでは断定できない。



(a) $X = L/2$



(b) $X = L/3$



(c) $X = L/6$

図-8 BCモデルのき裂進展位置と速度

衝撃位置が $L/2$ および $L/3$ の場合は、他の試験体についても図-8と同様な破壊形状になる場合が多いが、 $L/6$ の場合は、図示のように、衝撃点直下の下縁からき裂が開始されない破壊

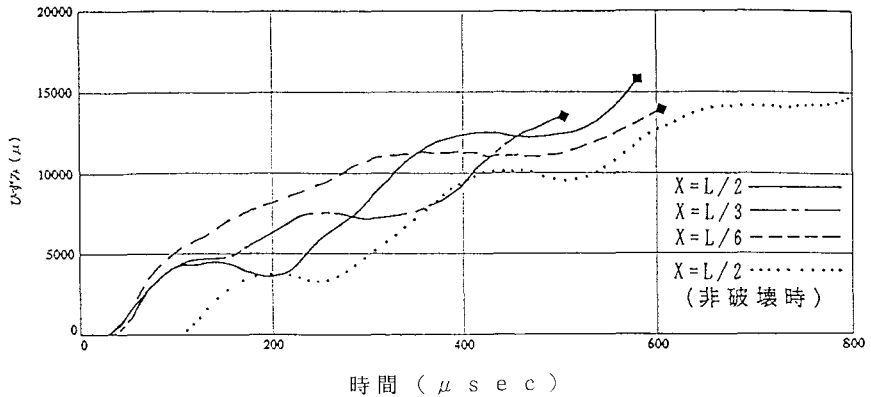


図-9 BCモデルの衝撃点下縁の動ひずみ

パターンは珍しく、 $L/3$ のパターンで破壊する場合はほとんどであった。これらは、衝撃条件または支点の状態が一定でないためと考えられる。

また、き裂進展速度は、衝撃位置が $L/6$ の場合しか写真から読み取ることができなかったが、き裂がはり軸に平行な方向に進展している場合が 725m/s で最も早く、き裂がはり軸直角方向に上昇および降下する場合は $125\text{m/s} \sim 325\text{m/s}$ である。

図-9の $X=L/2$ のひずみ波形は、写真-4 (a) とは別の測定値であり、写真の場合より約 $200\mu\text{s}$ き裂開始時刻が早い。この差は、BNモデルの場合に対して述べたように、ひずみ波形が局所的なピークを持つ部分に対応しているためと考えられる。また、図-9によると、 $X=L/2$ の場合の動的終局ひずみは $15,630\mu$ で、静的終局ひずみ ($15,000\mu$) の1.04倍であり、本実験では両者にほとんど差がない。

5. おわりに

横衝撃を受ける脆性はりの衝撃破壊過程の可視化を、動光弾性実験によって行うことを目的とした本研究において、弾性波動応答の可視化に比較すると、破壊過程の可視化は、実験装置の制約により不満足ではあるが、き裂の刻々の進展状態を追跡でき、一応の成果を挙げることができた。しかし、き裂の進展速度と動的応力拡大係数の関係は多方面で研究中であり、き裂先端での応力状態を知ることは極めて重要である。したがって、光弾性学的手法により、これらを解明できることが望ましいが、現状では上記のように実験装置の制約により、光弾性縞模様の鮮明さが不足しているためそれらを測定できない。現在、き裂先端付近の応力状態を推定できるように撮影系を改良することを検討中である。

参考文献

- 1) J. Miklowitz: The Theory of Elastic Waves and Waveguides, North-Holland, pp.367-409, 1978.
- 2) 佐藤 誠: 直角分岐構造内の波動伝播, 土木学会論文報告集, 第265号, pp.37-46, 1977.
- 3) S. Kida and J. Oda: On Fracture Behavior of Brittle Cantilever Beam Subjected to Lateral Impact Load, Experimental Mechanics, pp.69-74, 1982.
- 4) M. Nishida and K. Kawata: Photoelasticity, Springer-Verlag, pp.73-88, 1986.
- 5) 佐藤 誠: 動光弾性実験による平面SV波が入射した自由境界の表面波挙動, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.27-36, 1989.
- 6) J. A. Zukas et.al.: Impact Dynamics, John Wiley, 1982, pp.241-276.
- 7) 佐藤 誠: 平面波入射による凹隅角部からの散乱波の動光弾性解析, 日本光弾性学会第12回研究発表

- 講演会論文集, No.12, pp.99-102, 1990.
- 8) J.D.Achenbach: Wave Propagation in Elastic Solids, North-Holland, pp.236-254, 1973.
- 9) 佐藤 誠・崎山郁夫: 衝撃集中荷重を受けるはりおよび骨組み構造の動光弾性解析, 日本光弾性学会第13回研究発表講演会論文集, No.13, pp.95-98, 1991.
- 10) L.R.F.Rose: Recent Theoretical and Experimental Results on Fast Brittle Fracture, Int.Journ. of Fracture, Vol.12, No.6, pp.799-813, 1976.
- 11) 青木 繁他: 脆性材料におけるき裂進展の破壊力学的研究, 日本機械学会論文集, Vol.41, No.347, pp.1942-1948, 1975.
- 12) L.B.Freund: Crack Propagation in an Elastic Solid Subjected to General Loading—I. Constant Rate of Extension, J.Mech.Phys.Solids, Vol.20, pp.129-140, 1972.
- 13) W.B.Bradley: Fracture Dynamics-A Photoelastic Investigation, Engineering Fracture Mechanics, Vol.3, pp.317-332, 1971.
- 14) 矢川元基編: 破壊力学, 培風館, pp.59-84, 1988.
- 15) G.Sun: An Experimental Investigation of Dynamic Crack Propagation, Engineering Fracture Mechanics, Vol.17, No.1, pp.27-35, 1983.

(1992年9月21日 受付)