

衝撃力特性を考慮した脆性はりの衝撃破壊

IMPACT FRACTURE OF BRITTLE BEAM CONSIDERING THE IMPACT LOAD CHARACTERISTICS

佐藤 誠*、高橋江助**

Makoto SATOH and Kousuke TAKAHASHI

*工博 広島大学助教授 工学部第四類 (〒739 東広島市鏡山1-4-1)

**広島大学大学院 工学部構造工学専攻 (〒739 東広島市鏡山1-4-1)

This paper presents the fracture processes for two types of impact loads and their stress wave fields of brittle beams subjected to lateral impact loads experimentally and analytically. The beam models having rectangular cross section made by epoxy resin were impacted laterally by a steel falling weight through an input steel rod. One of the impact load pulse had very large peak value and short rise time, and the other pulse had not so large peak value. The dynamic fracture processes were visualized by dynamic photoelasticity and were evaluated numerically by finite element method using the dynamic J integral. In the former impact load, the fracture was initiated in an early stage of the impact and the beam deformed locally at the fracture initiation, while in the latter the fracture was initiated in a later stage of the impact and the beam deformed along the entire span. As the dynamic stress intensity factor of the crack tip depends only on dynamic stress field of the neighbourhood of the tip, the fracture processes including the crack speed and the crack trajectory are similar to both impacts.

Key Words: impact fracture, brittle beam, impact load, dynamic fracture toughness

1. まえがき

これまで、土木構造物への衝撃荷重は、落石覆工への落石の衝突、原子炉施設への航空機の衝突、ガードレールへの車両の衝突、砂防施設への土石流の衝突、港湾施設への船舶の衝突などに対する設計荷重として考えられてきた¹⁾。

しかし、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災で構造物に発生した人命にかかわる甚大な被害には、従来の地震被害では経験しなかった破壊の様態が含まれていることが報告されている²⁾。すなわち、地震力のなかの衝撃的外力による脆性破壊が生じている可能性があることが指摘され、外力とその破壊メカニズムについて現在多くの研究が行われている。

脆性破壊は、動的または静的荷重によるとにかかわらず、構造物の破壊が瞬時に発生するため直接人命にかかわる破壊であり、破壊過程の研究は急務である。

筆者らは、これまで、衝撃荷重を受けたはり内の波動伝播応答および脆性はりの衝撃破壊について、エポキシ樹脂によるはり模型を対象に、動光弾性実験と動的破壊解析を併用して実験的ならびに解析的に研究を行ってきた^{3) 4)}。

その結果、衝撃力を受けたはりにおいて、極めて短い

衝撃継続時間、すなわち、はりの基本固有周期より短い継続時間の衝撃に対しては、はり内の波動伝播による局所的な応力状態と応答を無視することができず、この状態で破壊するとき、静的な曲げ破壊の場合と異なった破壊過程を持つことが明らかにされた⁵⁾。

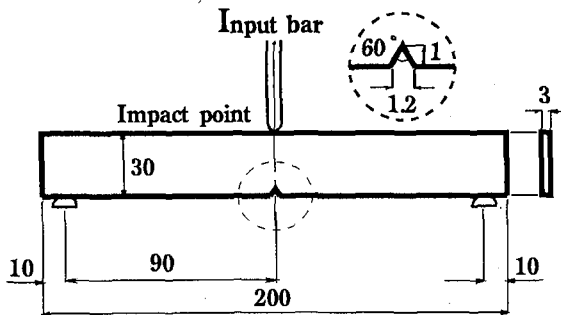
はり内の応力状態は、はりへの衝撃力パルスの形に支配される。すなわち、パルスの形と継続時間および荷重のピーク値などの違いがはりの応力状態の違いとして現れるから、当然、衝撃破壊過程にも影響を与えると考えられる。

このことを検討するために、ここでは、立ち上がりが鋭くピークの大きい衝撃力により、はり全体に衝撃力が伝播する以前にはりの固有周期より短い時間で破壊が始まる場合と、比較的緩やかに作用する衝撃力により、はり全体が曲げ変形した後で破壊する場合の2種類の衝撃荷重について、脆性材料のはり模型の動光弾性実験を行った。さらに、これら2種類の荷重およびこのうちのひとつと衝撃パルス形は相似でピーク値が異なる3種類の衝撃荷重について動的破壊解析を行い、破壊過程の衝撃力依存性と破壊靱性の亀裂進展速度依存性を検討した。

2. 実験模型と実験法

2.1 はり模型

図－1 に動光弾性実験に用いたはり模型を示す。



図－1 はり模型 単位:mm

はり模型は、筆者らの研究室で鋳型して得たエポキシ樹脂(アラルダイトB)の板から切り出して加工した。スパン180mmの模型の中央下縁に図中に示した形と寸法の切り欠きを持ち、両端を単純支持している。これまでに行った実験で⁴⁾、はり幅が6～10mmであると、破壊実験における破断面がねじれ、はり幅方向にはり軸と直角でない場合があり、できるだけはり側面に垂直な破断面のみを生じさせたいために、本実験でははり幅を3mmと薄くしている。

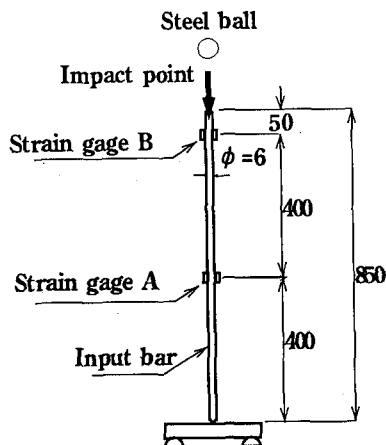
波動論的考察に必要な模型材料の動的性質を表－1に示す。

表－1 模型材料の動的性質

板内の縦波速度 度 C_L (m/s)	横波速度 C_T (m/s)	ポアソン 比 ν	密度 ρ (tf/m^3)
1,890	990	0.45	1.22

2.2 衝撃力

はりへの衝撃は落錘の落下によって行うが、ここではスパン中央のはり上縁に垂直に立てた入力棒を介して衝撃を与えた。

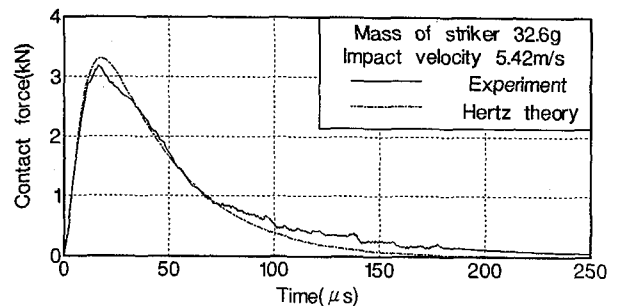


図－2 入力棒を介した落錘衝撃 単位:mm

図－2に、はりに衝撃力を与えるための落錘と入力棒およびはり模型の関係を示す。

長さ850mm、直径6mmの丸鋼の入力棒に接着したひずみゲージA、Bで測定された棒軸方向の動ひずみから、落錘による入力棒への衝撃力 $F_0(t)$ とはりへの衝撃力 $F(t)$ とを測定した。ただし、ひずみゲージAは入力棒の下端とひずみゲージBの中央に設置してある。

入力棒への衝撃力 $F_0(t)$ は、衝撃力のパルス長が1,600mm以下であれば、ひずみゲージBの動ひずみから直ちに得られ、図－3に、それに対応する質量32.6g、衝撃速度5.42m/sの鋼球落錘によって衝撃した場合の $F_0(t)$ について、Hertzの理論⁶⁾による計算値と実験値とを比較して示す。



図－3 入力棒への衝撃力の Hertz の理論値と実験値

図－3に示されているように、入力棒への落錘衝撃力はHertzの理論によって得られる衝撃力とよく一致している。

はりへの衝撃力 $F(t)$ は、 ε_A と ε_B をそれぞれひずみゲージAおよびBのひずみとし、EとSをそれぞれ入力棒の弾性係数と断面積とすると次式で与えられる。

$$F(t) = ES \{ \varepsilon_A(t + \tau) + \varepsilon_A(t - \tau) - \varepsilon_B(t) \} \quad (1)$$

ここに、 $\tau = d/c$ で、 c および d はそれぞれ入力棒内の縦波の伝播速度およびA、B間の距離である。

なお、この衝撃方法を採用したことにより、落錘を直接はりへ衝突させる場合よりはりへの衝撃を確実に再現でき、そのため破壊過程の再現性も向上した。

落錘衝撃には、前述した衝撃力特性を変えるため、2種類の衝撃Ip-1およびIp-2を与えた。表－2にそれぞれの衝撃条件とはりへの衝撃時間を示す。

表－2 落錘質量、衝撃速度およびはりへの衝撃時間

衝撃力	落錘質量	衝撃速度	衝撃時間
Ip-1	1,015 g	3.96 m/s	約 350 μ s
Ip-2	287 g	1.99 m/s	約1,600 μ s

上記の2種類の衝撃力は、衝撃初期にはりの衝撃点近傍の断面のみが局所的な曲げ状態で破壊が開始する場合と、衝撃後時間が経過し、はり全体が下に凸の変形状態にいたって破壊が開始する場合とを比較するために採用したもので、前者がIp-1であり後者がIp-2である。

衝撃Ip-2によるはりへの衝撃時間はIp-1の約4.5倍である。なお、模型はりの基本固有周期は約1,400 μ sである。

図-4に、式(1)で求めた両衝撃力によるはりへの衝撃力 $F(t)$ を示す。ただし、これらは、はり破壊した場合のもので、はりへの最大衝撃力は、Ip-1はIp-2の2倍以上である。

衝撃Ip-2による衝撃力は、大別して0~200、400~1,000、1,000~1,600 μ sの3グループに分けられ、それぞれのグループのピーク値は後のグループほど漸増している。第1グループはいわゆる初期衝撃力であり、第2グループ以後は、約300 μ sで入力棒内を往復する縦波 $F_0(t)$ とはり内を往復する曲げ波による応答が重ね合わされて生じている。特に、はり中央で左右からの曲げ波が重ね合わされる度に応答が漸増することが確かめられている。

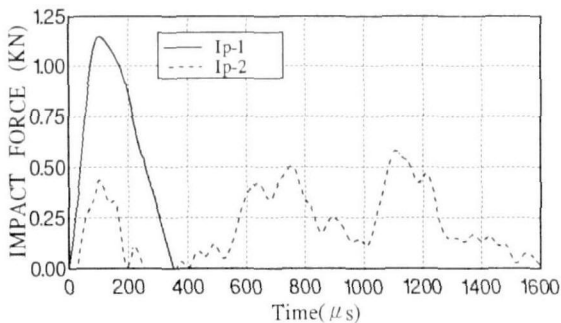


図-4 はりへの衝撃力 $F(t)$

2.3 動光弾性実験法

図-5に、動光弾性実験装置のシステムを示す。動光弾性実験装置は、光源系と撮影系を除くと通常の2次元光弾性装置である。破壊すなわち亀裂の進展のような高速現象を連続撮影するため、光源系と撮影系には、

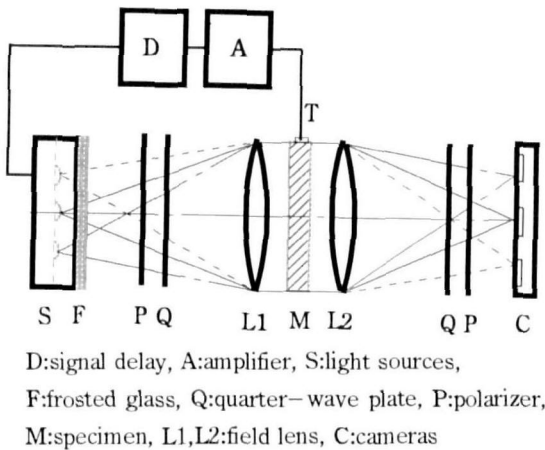


図-5 動光弾性実験装置のシステム

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いる。したがって、一回の衝撃に対して1~999 μ s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。撮影系として用いられたカメラは、シャッターが解放できるように改良した使い捨てカメラである。

入力棒への衝撃力によるひずみゲージ出力をトリガー系に入力すると、予め設定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、視野レンズで各Xeフラッシュに対応するように焦点位置が調整された9個のカメラに多重露出にならないように光束が入射される。なお、各カメラのシャッターは開放していなければならないので、実験は暗室状態で行われる。

3. 実験結果

3.1 動光弾性写真

衝撃Ip-1およびIp-2によるはりの衝撃破壊過程を、動光弾性実験で撮影された等色線縞模様写真としてそれぞれ図-6、7に示す。ただし、各駒の時間は、はりへの衝撃が開始されてからの時間を示す。以下ではこの時間を衝撃後の時間と呼ぶ。

これらの写真は、実験装置の光源系と撮影系を改良した結果、参考文献(8)に示されているそれらより、等色線縞模様および亀裂の進展などが格段に鮮明に撮影されている。

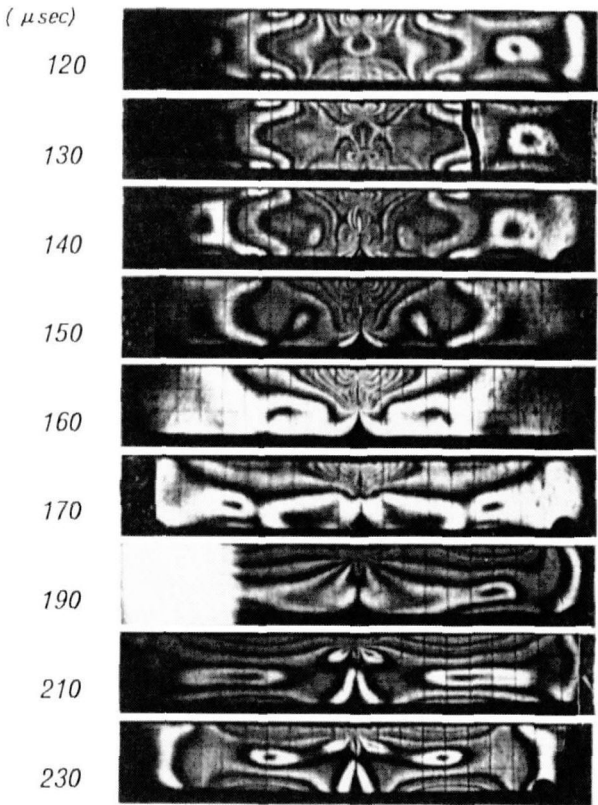


図-6 衝撃Ip-1による等色線縞模様写真

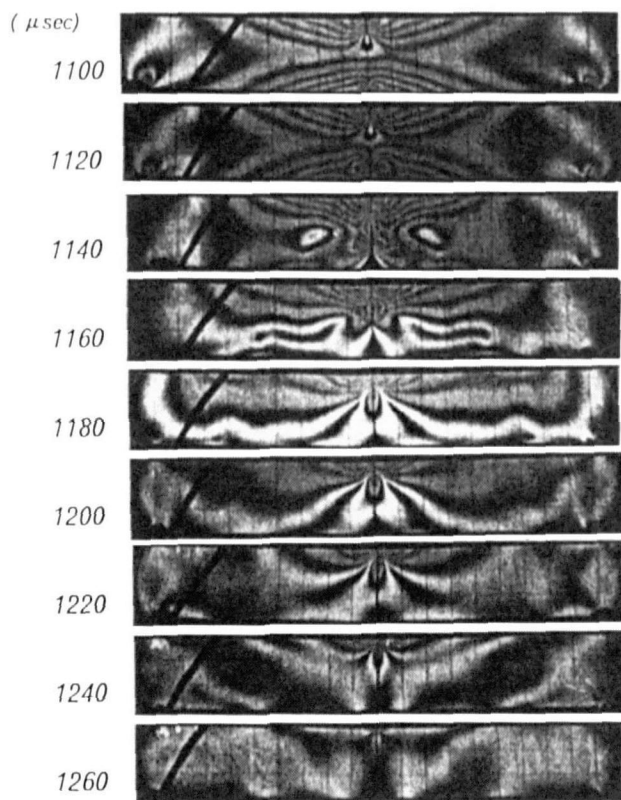


図-7 衝撃Ip-2による等色線縞模様写真

亀裂の進展過程を分かり易く示すため、動光弾性写真から各駒の亀裂先端位置を読み取り、そのときの衝撃後時間および相隣る駒間の平均亀裂進展速度 $\dot{a}$ をそれぞれ図-8、9に示す。

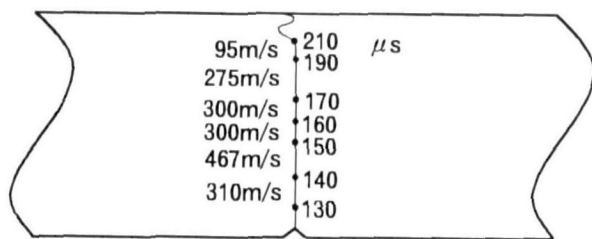


図-8 衝撃Ip-1による亀裂進展図

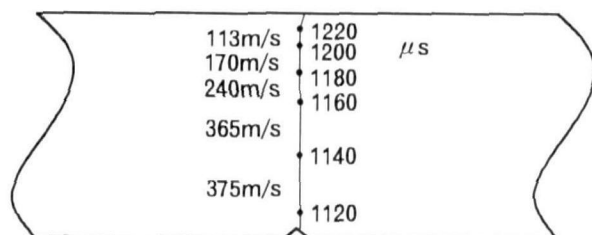


図-9 衝撃Ip-2による亀裂進展図

3.2 はりの衝撃破壊過程

(1) 衝撃Ip-1の場合

衝撃Ip-1に対して図-6の写真および図-8から、衝撃後120 μ sと130 μ sの駒の間で、亀裂が切り欠き先端から進展し始め、ほぼ垂直上方に進展し、210 μ s以後で亀裂がはり上縁に達して破断していることが分かる。

亀裂開始直前の120 μ sの駒のはり内の等色線縞模様には、この時点で、衝撃点から左右にスパンの約1/4部分の長さのみが下に凸の曲げ応力状態であり、その部分からはり端までは、上に凸の曲げ応力状態であることが示されている。また、この時間は、はり上縁の衝撃力のピークがはり下縁に到達する時間に近く、衝撃力のピークが形成する曲げ波はまだはり全体に伝播していない。

一般に、横衝撃を受けたはりには、衝撃力がはり内に実体波(縦波、横波)、表面波などの各種の応力波となって上下縁で反射を繰り返しながら伝播する過程で、はりに曲げ変形を生じる見かけの波動が卓越する。この波動が曲げ波と呼ばれ、曲げ波の先端がはり端に到達するまで、曲げ波の先端部分には上に凸の曲げが発生し、一方、衝撃力が継続している衝撃点近傍は下に凸の曲げが発生している⁴⁾。

亀裂が進展し始めると、亀裂の両縁が自由境界となるため当然曲げ応力は解放されるが、同時にそれまでの引張応力状態が打ち消され無応力状態になる過程で亀裂縁からはり内部に向かって圧縮縦波が入射されることになる。さらに、刻々移動する亀裂先端からはその点を波源として実体波と表面波が発生し、表面波は亀裂縁に沿って伝播する。圧縮縦波の発生は曲げ応力の解放としてしか写真では認められないが、表面波は140 μ sと150 μ sの駒に認められる。

また、亀裂がほぼ上縁に達しさらに破断している210 μ sと230 μ sの駒では、はり両端に達した上に凸の曲げ波が反射して下に凸の曲げ波となり、それぞれ亀裂を挟んで両側のはり部に現れている。このような状態は、はり内に曲げ波が伝播中に衝撃破壊する場合にしか現れない。

図-8によると、亀裂の進展速度 $\dot{a}$ は亀裂進展開始時が最も速く横波速度の約40%であり、上縁に近づくにしたがって横波速度の約10%にまで減速する。

(2) 衝撃Ip-2の場合

衝撃Ip-2に対して図-7の写真および図-9に、衝撃後1,100 μ sと1,120 μ sの駒の間で、切り欠き先端から亀裂が進展し始め、1,220 μ s以後破断していることが示されており、亀裂開始直前の1,100 μ sの駒の等色線縞模様には、はりのスパン全体が下に凸の曲げ応力状態であることが示されている。したがって、この場合には、衝撃力の継続時間がはりの基本固有周期より長いため、はり全体が下に凸の曲げ応力状態で破壊が開始していると考えてよい。

図-9によると、亀裂進展速度 $\dot{a}$ は亀裂開始後まもなく横波の約46%の最大値に達し、その後やや減速してはり高中央付近まで横波の約30%の一定速度を保ち、はり上縁付近で急速に減速する。最終進展速度は横波の10%以下となる。

衝撃Ip-1とIp-2による亀裂進展過程を分かりやすく比較するため、図-10に亀裂開始後の時間とはり高Wで無次元化した亀裂長さ a の関係を示す。なお、衝撃Ip-2に対しては、再現性を示す意味で3個の模型の実験値を示した。

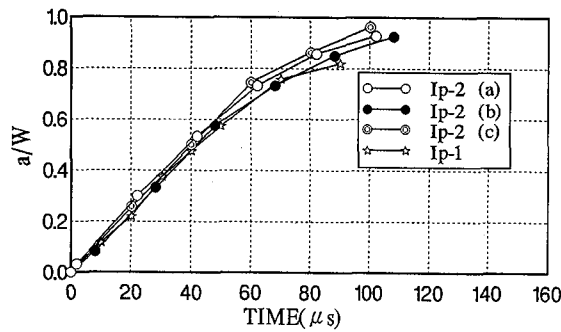


図-10 亀裂長さとの進展時間

図-10は、動光弾性写真の各駒から読み取った亀裂先端位置を時間に対して直接示しており、若干の読み取り誤差を含む駒間の平均値としての亀裂進展速度より、正確に測定できる亀裂長さの方が信頼性があることを考慮すると、本実験の範囲では、両衝撃力による亀裂進展過程はほぼ同一であるとみなせる。このことについては、以下に示す解析結果でも検討する。

4. 動的破壊解析

4.1 解析モデル

(1) 要素分割

はり模型の亀裂進展についての動的破壊解析は、8節点アイソパラメトリック要素を用いて平面応力場の有限要素解析によって行った。

図-11に、はり模型の要素分割図を示す。

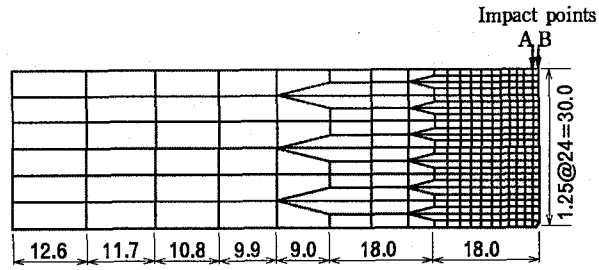


図-11 はり模型の有限要素分割図 単位mm

ここでは、スパン中央に衝撃荷重を受ける単純はりを対象としているので、対称性を考慮してはりの左半分を解析領域とした。

衝撃点と切り欠きを含む中央断面付近の最小要素長は1.25mmとし、はり全体では305要素、985節点となってい

る。なお、はり解析に用いるはり模型の動的性質には、表-1の値を用いた。

(2) 衝撃力

図-12に、解析に用いた3種類の衝撃力を示す。

解析に用いたはりへの衝撃力は、実験で得られた衝撃Ip-1とIp-2のほかに、Ip-1と相似のパルス形でピーク値を0.47倍した衝撃Ip-3の3種類とした。

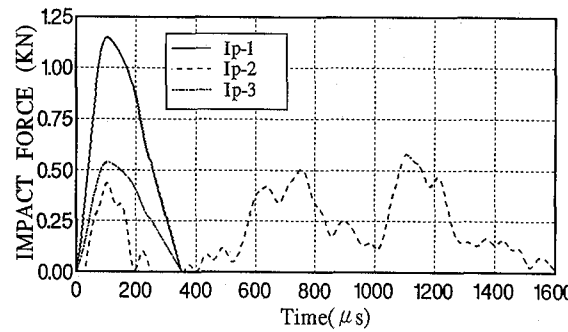


図-12 解析に用いた衝撃力

衝撃Ip-3は、実験におけるIp-1の立ち上がりとピーク値が大きすぎ、衝撃初期のはりが局所的な曲げ状態で破壊したことを考え、はり下縁の切り欠き先端の応力拡大係数の最大値が破壊靱性値をやや超える程度のピーク値を持つ衝撃力を与え、衝撃Ip-2の場合と同様に、はり全体が曲げ状態となって破壊する場合を考えるための数値実験用の衝撃力として採用した。

4.2 亀裂進展解析法

(1) 解析パラメータ

線形破壊解析では、亀裂先端の応力拡大係数が材料の破壊靱性を超えたとき亀裂が進展すると考える。したがって、実験などで求められた破壊靱性をもとにして、応力拡大係数を計算することが問題となる。

ここでは、破壊エネルギー開放率が応力拡大係数と一対一対応していることを用いる。この破壊エネルギー開放率はJ積分で与えられることから、積分経路に依存しない性質を持つJ積分を求めて応力拡大係数を計算した。ただし、これらの理論的背景を述べるのは本研究の主旨ではないので、ここにはそれらを述べず、参考文献(7)、(8)を挙げるにとどめる。

なお、本研究で扱う衝撃破壊においては、すべて動的現象であると同時にモードI(開口モード)の破壊であるので、必要なパラメータは、動的破壊靱性 K_{I0} と動的応力拡大係数 $K_I(t)$ であり、J積分は慣性力の効果を考慮した修正J積分となる。

動的エネルギー開放率 $G(t)$ と応力拡大係数 $K_I(t)$ の関係は、平面応力状態に対して次式で与えられる。

$$G(t) = \{K_I(t)\}^2 / 2\mu(1 + \nu) \quad (2)$$

ここに、 t は時間、 μ はせん断弾性係数、 ν はポアソン比である。

結局、破壊亀裂が進展し続ける条件は

$$K_I(t) = K_{I0} \quad (3)$$

となる。

(2) 動的破壊靱性

式(3)の K_{I0} は、一般に、亀裂の伝播速度の関数であり、一定ではないとされている⁸⁾。しかし、これを実験的に求めるのは容易でないので、ここでは、参考文献(9)で、Bernoulli-Euler はり理論に用いられた高分子材料についての関数形(陰関数)から、最も確からしい関数形を探すために、図-13に示すような、亀裂の伝播速度に関して一定値を含むA、B、Cの3種類の動的破壊靱性曲線を採用した。

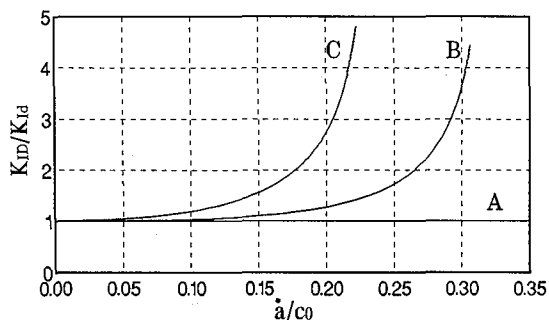


図-13 動的破壊靱性曲線

図-13の横軸 $\dot{a}/c_0$ は、エポキシ棒内の縦波の伝播速度 c_0 で無次元化した亀裂進展速度であり、縦軸 $K_I(t)/K_{I0}$ は、本研究で用いたエポキシ樹脂に対して、すでに筆者らが求めている静的破壊靱性 $K_{I0}=1.8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ で無次元化してある。

亀裂が進展を開始する瞬間は、進展速度 $v=0$ であるから、破壊靱性は静的破壊靱性 K_{I0} に等しいと考え、亀裂進展開始の条件を

$$K_I(t) = K_{I0} \quad (4)$$

とする場合が多い。しかし、後で示すように、衝撃力特性、材料性質および模型の形状などにより、必ずしもこの条件が適用できるとは限らない。

(3) 解析手順

線形破壊解析を行う手順のフローチャートを図-14に示す。

1) まず、修正J積分を計算し、式(2)により応力拡大係数を求める。

2) この応力拡大係数が静的破壊靱性 K_{I0} に達したとき亀裂が進展を開始とする。なお、亀裂進展が始まるまでの動的解析の解析時間間隔は $\Delta t=1\mu\text{s}$ としている。

3) 亀裂進展開始後、動的破壊靱性が一定とする場合以外は、適当に亀裂進展速度を仮定し、解析の1ステップで図-11に示したはり中央断面の亀裂先端の4節点を解放する。仮定した進展速度に対してJ積分を行い、応力拡大係数が、考えている動的破壊靱性曲線と交わるかど

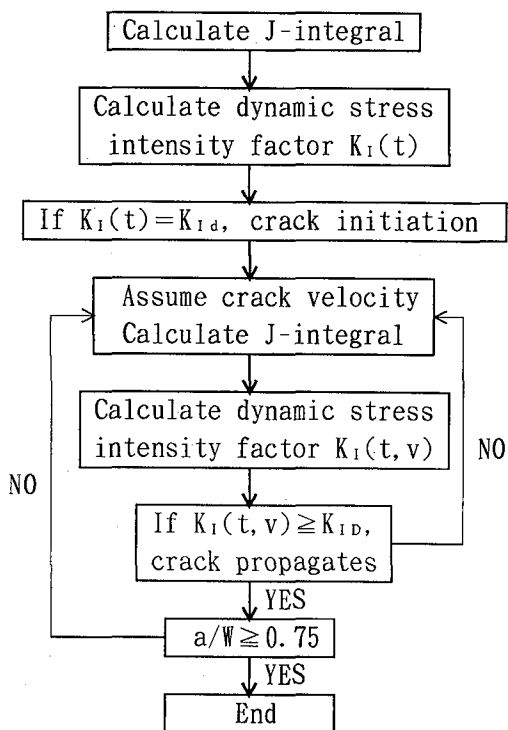


図-14 亀裂進展解析のフローチャート

うかを判定する。仮定した亀裂進展速度に対する応力拡大係数が破壊靱性曲線よりわずかに大きい値となったとき、それを亀裂が進展を続ける速度とする。本解析では、1ステップにつき4～6回の試行錯誤計算が必要であった。また、この段階の計算における解析時間間隔は、亀裂進展速度と節点間距離で決められるが、すべての場合に $1\mu\text{s}$ 以下であった。

4) 本解析では、亀裂進展に伴って移動する3種類の積分領域を設定したが、その最終領域の関係から9ステップ、36節点の解放までで解析を打ち切った。そのため、以下に示す亀裂進展長さは $a/W=0.75$ までしか得られていない。

4.3 解析結果

(1) 応力拡大係数

まず、図-12に示した3種類の衝撃 I_{p-1} 、 I_{p-2} 、 I_{p-3} それぞれに対して、亀裂開始時のはり中立軸のたわみ曲線 V_N を図-15に示す。

この図から、衝撃 I_{p-1} の場合にスパン中央付近のみが局所的に下に凸のたわみ形で、 I_{p-2} と I_{p-3} の場合は、はり全体が下に凸にたわんだ状態で、亀裂が開始していること、また、衝撃力のピーク値がほぼ等しくても力積の大きい I_{p-2} の方が I_{p-3} よりたわみが大きいことが分かる。

図-16、17に、それぞれ衝撃 I_{p-1} と I_{p-2} および衝撃 I_{p-1} と I_{p-3} による衝撃力と、衝撃後の亀裂先端における応力拡大係数の時間変化を示す。

図-16、17において、矢印で示した位置が亀裂開始時

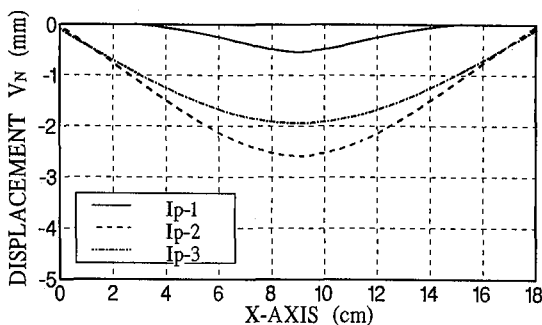


図-15 亀裂開始時のはりのたわみ

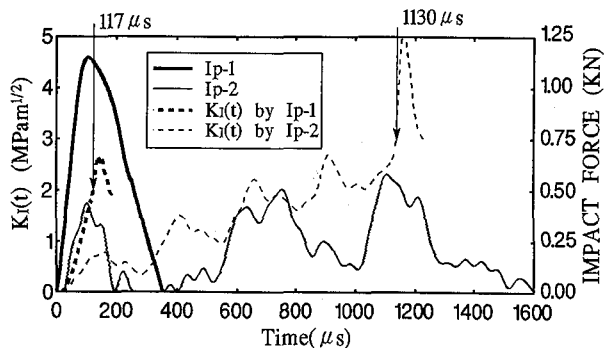


図-16 衝撃Ip-1、Ip-2の応力拡大係数

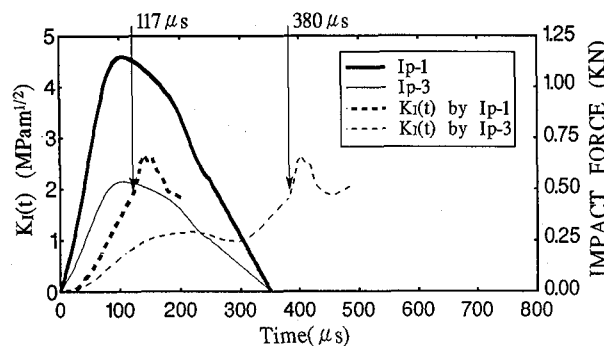


図-17 衝撃Ip-1、Ip-3の応力拡大係数

間である。それ以後の応力拡大係数は、亀裂が進展しているときの値であり、破断して終わる。

図-16によると、衝撃Ip-1については、亀裂開始時の応力拡大係数が静的破壊靱性に等しいとして解析した亀裂開始時間が実験値と一致している。

一方、衝撃Ip-2については、ここに示した以外の4例を含むすべての実験結果は、約1,130 μ sで亀裂が開始しており、この時間の応力拡大係数が破壊靱性に等しいと判断せざるを得ない。したがって、この場合は、静的破壊靱性でなく、解析で得られた時間の応力拡大係数2.76 MPa $\sqrt$ mを、この衝撃に対する亀裂開始時の破壊靱性として亀裂進展解析を行った。

なお、衝撃Ip-2による衝撃力波形には周期性がないが、応力拡大係数は衝撃力と無関係に約250 μ sの周期でピークが形成され、ピーク値も次第に増加している。

応力拡大係数は、亀裂先端近傍の応力状態に依存するから、この周期は、主としてはり内を往復する波動伝播

の効果を反映していると考えられる。ただし、この周期約250 μ sは、はりの2次の固有周期350 μ sと3次の固有周期156 μ sの間であるが、スパンの1/2を往復する波動と考えると、約720m/sの伝播速度を持つ波動となるから横波の伝播速度より遅く、この場合の曲げ波の伝播速度と考えられる。

ここには示さないが、応力拡大係数のピークが現れる時刻は、はりのたわみの時間変化から、はり中央部の下に凸の曲げ波とはり端で反射された下に凸の曲げ波がスパン中央部で重なり合う時間であることが確かめられている。

図-17の衝撃Ip-1とIp-3では、衝撃パルス形と最大衝撃力は異なるにもかかわらず、亀裂開始時に静的破壊靱性を用いているため、破壊開始時間は遅れるが、応力拡大係数の最大値は両者に対して等しい。

(2)破壊靱性と亀裂進展過程

はりの衝撃破壊過程を調べるには、破壊靱性、破壊経路および亀裂進展過程などがあるが、本研究による破壊経路はモードIの破壊であることから、実験結果にも示したように衝撃力によらずほぼ同一であった。

ここでは、亀裂進展経路に沿う亀裂進展過程と図-12に示した破壊靱性の速度依存性を検討する。

図-18に、破壊靱性曲線A(一定)とBについて、衝撃Ip-1による亀裂開始後の時間と亀裂長の解析結果と実験結果を示す。

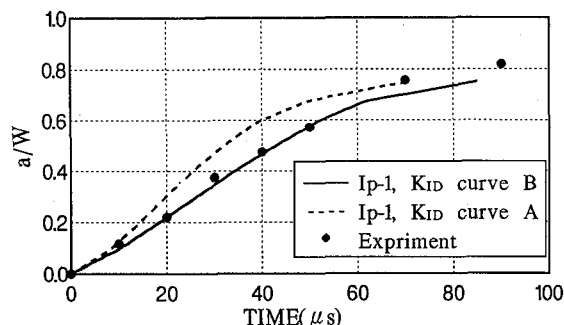


図-18 衝撃Ip-1の亀裂進展過程

この解析結果によると、動的破壊靱性を亀裂進展速度によらず一定とした曲線Aの場合は実験値と異なり、明らかに動的破壊靱性に速度依存性があることを示している。

図-19に、数値実験として行った衝撃Ip-3に対して、動的破壊靱性曲線A、B、Cそれぞれを用いて解析した結果と、はり全体が曲げ変形して亀裂進展を開始する意味で同じ衝撃Ip-2の実験結果を比較して示した。

衝撃Ip-3には実験値がなく、Ip-2の実験結果と比較するのは無理があるとも考えられるが、各破壊靱性曲線による亀裂進展過程の違いを明らかにするために、比較の目安として図中に示した。

解析値は、衝撃Ip-2の実験値とはどのような場合も一致しな

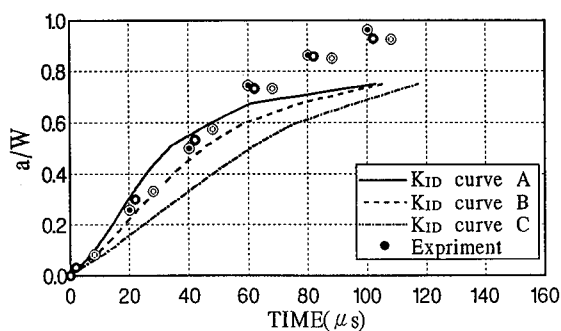


図-19 衝撃Ip-3の亀裂進展過程

いが、破壊靱性曲線A、B、Cの順に図の初期勾配が小さくなり、破壊靱性の亀裂速度依存による傾向が良く示されている。また、もし、実験値との比較が適当であれば、衝撃後約50 μ s、下縁からはり高の1/2程度までは、実験値は曲線AとBの中間にあり、亀裂開始後の亀裂速度がほぼ一定である間は曲線A、Bどちらも適用できそうである。しかし、亀裂進展速度が減速し始めると実験値と大きく離れる。

図-20に、衝撃Ip-2に対して、破壊靱性曲線BとCを用いた亀裂進展過程を図-18と同様に示す。

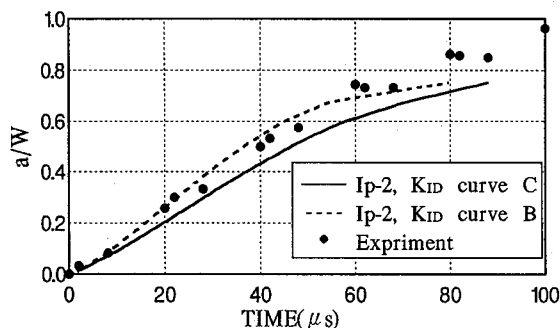


図-20 衝撃Ip-2の亀裂進展過程

図-18の結果から、動的破壊靱性を亀裂進展速度によ

らず一定とすることが不適当であることが明らかとなったので、図-20には衝撃Ip-2に対しては破壊靱性曲線B、Cによる亀裂進展過程と実験結果を比較した。

この図では、実験値が破壊靱性曲線BとCの間にある。解析上、曲線Bは、初期の亀裂進展速度が実験値より大きく、曲線Cの方が実験値によく一致しているが、亀裂進展の後半を含めた全体的としては曲線Bの方が曲線Cより実験値に近い。

5. まとめ

ここまで述べてきた脆性はりの衝撃破壊に関する実験および解析について、本研究の範囲で以下のようにまとめられる。

(1) はりの基本固有周期よりかなり短い衝撃継続時間を持つ衝撃力Ip-1と基本固有周期程度の継続時間の衝撃力Ip-2に対して、亀裂進展時のはり内の応力状態は大きな差があるが、亀裂進展速度から見た亀裂進展過程には大きな影響を与えない。

(2) 亀裂先端の動的応力拡大係数は、衝撃パルス形には依存せず、曲げ波がはり端で反射することによる応力波伝播に伴う応力状態に支配され、衝撃継続時間が長いと周期的にピークを形成しながら増加する。

(3) 衝撃Ip-1のような衝撃初期の局部的曲げで破壊を開始する場合の亀裂進展開始時の破壊靱性は静的破壊靱性と等しいが、衝撃Ip-2のようにはり全体が曲げとなって破壊を開始する場合のそれは前者より大きく、衝撃パルス形や破壊時の応力状態によって、亀裂開始時に静的破壊靱性とならない場合がある。

(4) エポキシ樹脂の動的破壊靱性は亀裂進展速度に依存し、図-13に示すように、亀裂の進展速度の増加とともに急激に増加する傾向を持つ。

(5) 動的破壊靱性を適切に選んだ場合、本研究の線形破壊解析の結果は実験結果をよく表現している。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法、構造工学シリーズ6、土木学会、pp.153-312、1993。
- 2) たとえば、土木学会：阪神大震災震害調査緊急報告資料、土木学会、1995。
- 3) 佐藤誠：横衝撃を受けるはり内の波動挙動の動光弾性実験、第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、土木学会衝撃問題研究小委員会、pp.7-12、1993。
- 4) 佐藤誠：動光弾性実験による脆性はりの衝撃破壊過程の可視化、構造工学論文集 Vol.39A、pp.1554-1562、1993。
- 5) M.Satoh: Dynamic photoelasticity for wave propagation and failure process of beams subjected to lateral impact

- loads, Structures under Shock and Impact III, Computational Mechanics Publications, pp.459-469, 1994.
- 6) W.Goldsmith: Impact, Edward Arnold Publishers, pp.46-55, 1960.
- 7) K.Kishimoto, S.Aoki and M.Sakata: Dynamic stress intensity factors using J-integral and finite element method, Int. Fracture Mechanics, Vol.13, pp.387-394, 1980.
- 8) 矢川元基：破壊力学、培風館、pp.59-84, 1988。
- 9) C.Levy and G.Herrmann: Effect of shear and rotary inertia on dynamic fracture of a beam or plate in pure bending, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol.49, pp.773-778, 1982.

(1995年9月18日受付)