

(51) 横衝撃を受ける脆性はりの衝撃破壊のメカニズムとせん断力の効果

SHEAR EFFECT AND MECHANISM OF IMPACT FRACTURE FOR BRITTLE BEAM
SUBJECTED TO LATERAL IMPACT LOAD

佐藤 誠*, 高橋江助**, 中屋幸久***

Makoto SATOH, Kousuke TAKAHASHI, Yukihiisa NAKAYA

*工博 広島大学工学部(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

**工修 神戸市住宅供給公社(〒651 神戸市中央区三宮町1丁目)

*** 長崎県(〒850-70 長崎市江戸町2番)

キーワード: 脆性はり, 横衝撃, 衝撃破壊, せん断力, 動光弾性実験
(brittle beam, lateral impact, impact fracture, shear force, dynamic photoelasticity)

1. はじめに

1995年1月の兵庫県南部地震によって多数のRC部材が脆性的に破壊されたことを契機に, これまでの地震ではほとんど問題にされることのなかった地震衝撃力と呼ばれる動的外力に対する脆性部材の挙動と動的破壊靱性が脚光を浴びるようになった.

上記の, 脆性的な破壊にはあらゆる破壊モードが混在していると思われるが, 特に, せん断が卓越した破壊モード, たとえば, RC橋脚の基部付近を含んで橋脚軸を斜めに横切るき裂あるいは破壊面の存在が注目を浴び, その破壊に対応する動的破壊のメカニズムや破壊過程を解明することが急務となっている. しかし, 一方で, これらの被害を及ぼした地震衝撃力の実体が明らかでなく, それらを含めた動的荷重と動的破壊靱性の関係を研究する必要がある.

筆者らはこれまで, 横衝撃力を受ける脆性はりの衝撃破壊問題について, 解析的及び実験的に解明し, 衝撃力と動的破壊靱性や破壊過程の関係などを明らかにしてきた¹⁾. ただし, 対象とした破壊形式は主として開口モード(モードI)でき裂が進展する場合であり, この場合は破壊き裂がはり軸に垂直に進展して破断に至る. しかし, せん断力が卓越する場での破壊過程, すなわち, き裂がはり軸に対して曲進するかまたは斜めに進展する場合についてはメカニ

ズムが十分に解明されていない.

ここでは, き裂が曲進する場合の進展方向を支配する要因とメカニズムを, はり内のせん断応力場が支配していると考え, その点を解明する目的で, 切欠きを持つはり模型に対する横衝撃力を, はりの対称軸上(はりスパンの1/2の位置)のみならず, はりスパンの1/3または1/4の位置に与え, せん断力が卓越する場合に, それによる応力場がき裂進展などの破壊過程に及ぼす効果を検討する.

2. はり模型と衝撃方法

図-1に, はり模型の寸法を, 図-2に, 実験ケースの記号, 模型の切欠き位置および衝撃位置を示す.

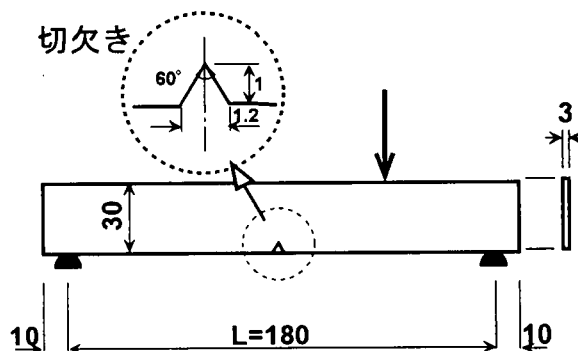


図-1 はり模型の寸法 単位mm

ここでは, 静的な意味ではあるが切欠き断面のせん断力と曲げモーメントの分布関係が異なるように, 切欠き位置と衝撃位置の組み合わせによる8種類の

実験ケースを対象とした。なお、各実験ケースとも約10体の破壊実験を行った。また、以下では衝撃点位置に対応するスパンの等分数を付けて、実験ケースをM2, M3, M4のようにも呼ぶ。

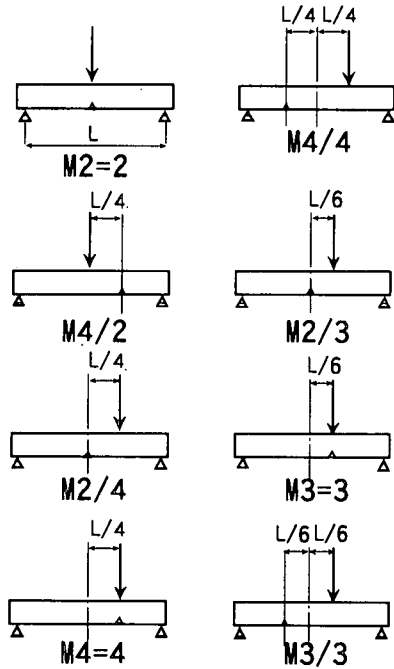


図-2 実験ケース(切欠き位置と衝撃点)

模型材料はエポキシ樹脂(アラライトB)で、その動的性質を表-1に示す。

表-1 模型材料の動的性質

弾性係数	横波速度	Poisson比	比重
3.56 GPa	1,003 m/s	0.45	1.22

図-3に、落錘と入力棒を用いた衝撃方法および衝撃力測定のためのひずみゲージ接着位置を示す¹⁾。なお、M4/4以外は、落錘重量250.5gf、衝撃速度 2.8m/sで衝撃したが、M4/4に対しては、切欠き模型が確実に破壊する衝撃力を得るために、落錘重量250.5gf、衝撃速度3.43m/sとして衝撃力を増加させた。

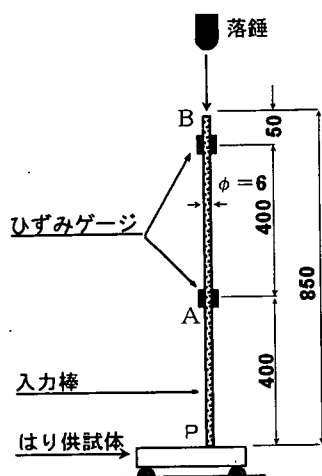


図-3 衝撃方法 単位mm

衝撃破壊実験における模型はり内の応力場とき裂進展過程は、動光弾性実験によって撮影された等色

線縞模様写真から読みとった。

3. 衝撃力

図-4に、切欠きがないはり模型の場合、すなわち、衝撃を受けても破壊しない場合について、M2, M3, M4の3種類の衝撃点に対する衝撃力と、これと同じ衝撃条件で切欠きを持つはり模型が破壊した場合の衝撃力をそれぞれ重ねて示す。

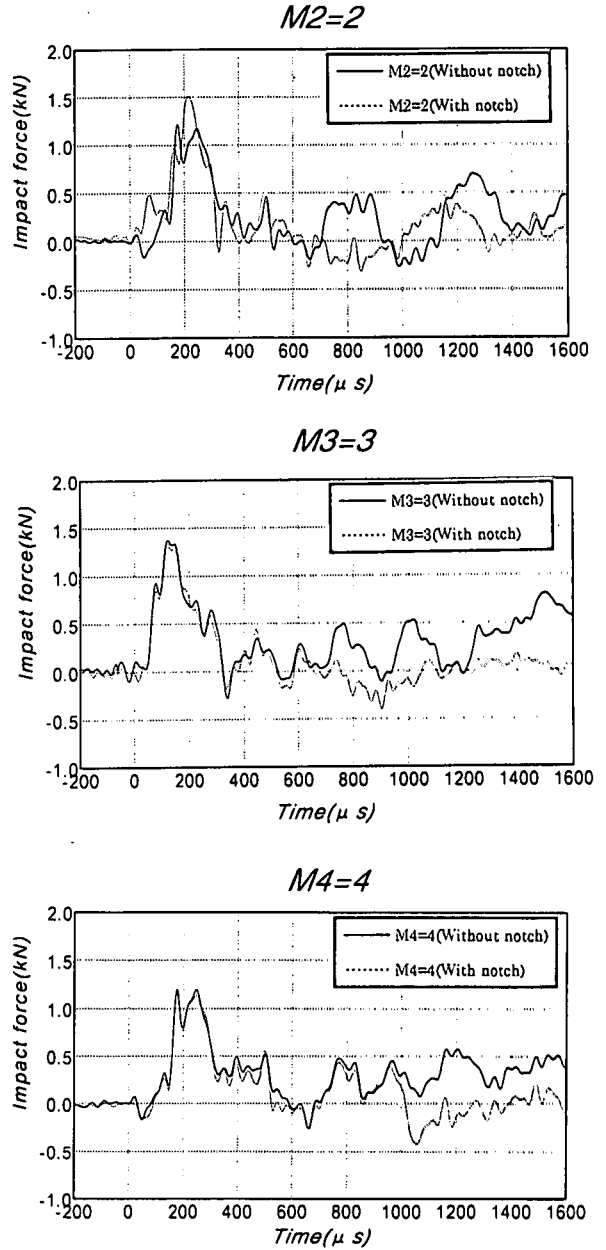


図-4 衝撃力波形 M2=2,M3=3,M4=4

(1) 切欠きを持たないはりの衝撃力

図-4によると、切欠きを持たないはりの衝撃力は、最初に約300 μ sの継続時間を持つ主パルスがあり、次いで、この主パルスのピークの1/2程度のピーク値を持つパルス波形が周期的に現れる。この主パルスの継続時間は、入力棒を縦波が往復する時間に相

ときも衝撃力はほとんど作用していない。き裂は、はり軸に垂直に進展する場合とややスパン中央寄りに曲進する場合もあった。き裂先端がはり高中央を越えた890 μ s以後も、左支点とき裂断面の間で下に凸の曲げが発達しており、(a)の場合と同じようにき裂先端にせん断力が発生していると考えられる。

ここには示していないが、M3=3の場合も、M4=4とほぼ同様であった。

(2) 衝撃点と切欠き位置が同一断面にない場合

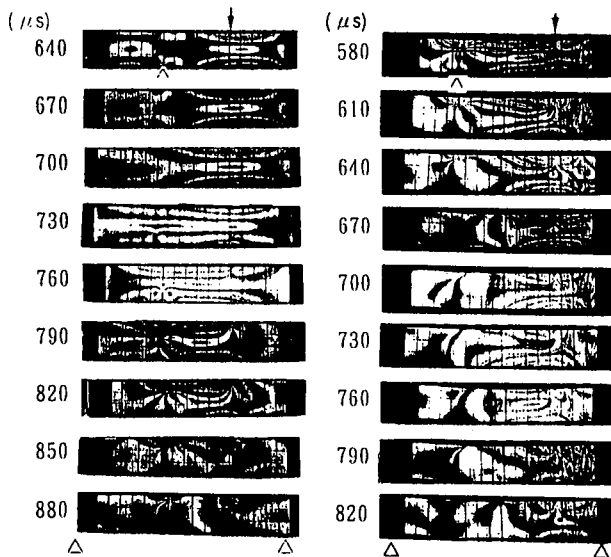


図-6 (c) M3/3

(d) M4/4

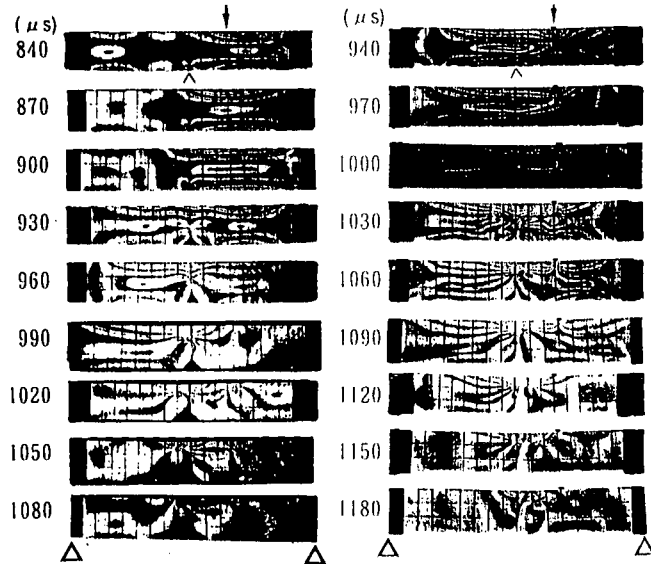


図-6 (e) M2/3

(f) M2/3

図-6(c) M3/3の場合、衝撃点を含む右半分の強い曲げが曲げ波の移動と重ね合わせにより切欠きのある左半分の強い曲げに移行する段階の890 μ sでき裂が開始し、はり高中央付近から衝撃点方向へき裂は曲進する。このときスパン中央付近には強い曲げが残っている。(d) M4/4の場合もほぼ同様である。

図-6(e) M2/3の場合、き裂開始直前のはり内の曲

げ状態は、(c)の場合と同様に強い曲げが右半分から左半分に移行する段階である。840 μ sでき裂が進展し始めてもその移行は続き、き裂先端がはり高中央を越えた時点(960 μ s)では左半分曲げの方が優勢で、き裂は左方向へ曲進している。また、破断する直前の1,080 μ sに左半分に曲げが残っている。

なお、き裂開始時刻に衝撃力はほとんど作用しておらず、990 μ sから作用し始める。

一方、(f) M2/3の場合は、切欠き形状のわずかな差で(e)よりき裂開始時刻が遅れ、1,030 μ sで開始したときは右半分の曲げが優勢となっている。その結果、き裂は右方向へ曲進している。(e)とは逆に1,180 μ sでは、右半分に曲げが残っている。なお、き裂開始時刻に衝撃力が若干作用している。

上述のことから、き裂進展開始は衝撃力が作用しているかどうかには依存せず、切欠き位置を含むはり内の曲げ状態に依存する。また、曲げ状態は、曲げ波の伝播に伴うはり端からの反射曲げ波との重ね合わせに支配され、衝撃位置によって曲げ波の重ね合わせられる位置が決まる。

き裂の曲進と曲進方向については、まず、曲げによる開口モードで切欠きからき裂が開始するが、き裂が進展してき裂を挟む左右の曲げに対応するせん断力がき裂先端に発生し、それによるき裂先端のせん断応力によって主応力方向がはり軸に対して傾く。したがって、曲げの大きい方へき裂が曲進し、曲進方向は衝撃点方向とは限らない。

6. まとめ

本研究の範囲で、脆性はりの衝撃破壊におけるせん断力の効果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 脆性材料を用いた動光弾性実験により、はり内の曲げ状態とき裂進展を同時に観測できる。
- (2) き裂の曲進と方向は、曲げを支えるき裂先端のせん断応力に支配される。
- (3) き裂進展過程で曲げの優勢な方向へき裂は曲進する。

なお、本研究は、文部省科学研究費、基盤研究(B)(2)、課題番号08455210の補助によって行われた。

参考文献

- 1) 佐藤誠：衝撃力特性を考慮した脆性はりの衝撃破壊，構造工学論文集，Vol.42A, pp.1261-1268, 1996.
- 2) 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回落石シンポジウム，pp.7-12, 1993.

当しており、その後の周期的な波形は、はり模型内を曲げ波が往復することによる効果も重ね合わされて現れていると考えられる。なお、本実験模型における曲げ波の伝播速度は400~500m/sである²⁾。

M2とM4の主パルスは、ほぼ同じピーク値を持つ2つのピークで形成されているが、M3の主パルスは単一のピークのみで形成されているという特徴がある。

(2) 破壊した場合(切欠きを持つはり)の衝撃力

この場合の衝撃力は、き裂発生後、それによる波動はりの衝撃点へ到達するまでは(1)の衝撃力波形と同一である。若干の測定誤差を含むが、(1)の波形と異なる時点からは破壊が始まったための影響が現れている。ただし、後で述べるように、き裂が進展している間でもき裂と支点間で曲げ波は往復しており、(1)と(2)の差のみでき裂開始時間を確定するのは容易でない。

4. 破断面の形状

図-5に、実験結果を代表する例として、M2=2, M4=4, M4/4, M3=3, M3/3に対する破断時のき裂経路図を示す。

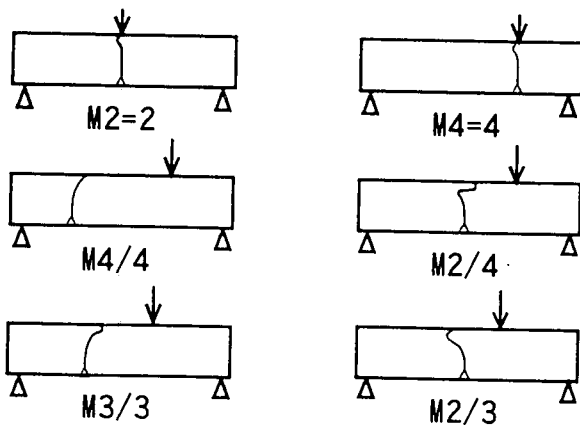


図-5 き裂経路図

衝撃点と切欠きが同一断面にある場合(M2=2, M4=4, M3=3), き裂はほぼはり軸に垂直に進展して破断する。しかし、衝撃点と切欠き位置が離れている場合(M4/2, M4/4, M3/3), き裂は、はり軸付近までは垂直に進展するが、それより上縁側では、衝撃点側へ曲進する。

ただし、M2/3, M2/4においては、曲進方向が衝撃点側とは限らず、逆方向へ曲進する場合もある。このような破壊は、材料の非均質、切欠き形状の誤差、衝撃力の作用状態の誤差によっても生じ得るが、M2/3では8/10, M2/4では8/16が衝撃点と逆側へ曲進している。発生割合から偶然とは考えられない。こ

のことも含めて、以下で動光弾性実験結果を考察する。

5. 等色線縞模様とき裂進展過程

図-6(a)~(g)に、動光弾性実験で得られた20または30 μ s間隔の等色線縞模様写真を示す。なお、写真の各駒の時間は、はりへ衝撃力が作用し始めてからの時刻であり、図-4の時間に対応している。

等色線縞模様は主応力差(最大せん断応力の2倍)の等高線であるが、き裂進展前後のはり全体の応力場が示されており、ここでは、その応力場から主としてはりの曲げ状態の変化、すなわち、曲げモーメントの符号、たわみ形状、せん断断面の位置などを読みとる。また、き裂の進展開始時間、進展経路、および駒間の平均進展速度なども読みとれる。

(1) 衝撃点と切欠き位置が同一断面にある場合

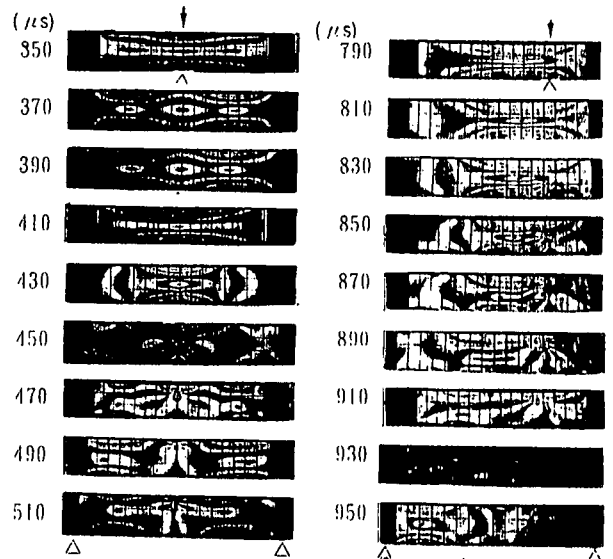


図-6 (a) M2=2

(b) M4=4

図-6(a) M2=2の場合、衝撃力の最初的主パルスが終了し、曲げ波が両支点から反射して再び中央で重なり合っはり全体が大きな曲げとたわみを生じている時点でき裂が開始し、このとき衝撃力はほとんど作用していない。き裂は、はり軸に垂直に進展し、破断時間は約100 μ sである。なお、き裂断面の曲げはき裂の進展とともに急速に開放されるが、き裂先端がほぼ上縁に達している490 μ sでもき裂と両支点の間で下に凸の曲げが存在する。このことは、き裂先端にこの曲げを支える反力としてのせん断力が発生していることを意味する。

図-6(b) M4=4の場合、き裂開始は、やはりはり全体が大きな曲げとたわみを生じている状態のときであるが、曲げ波がき裂断面で重なり合う時間がM2=2の場合より遅れるため、進展開始時刻は遅い。この