

(14) 衝撃を受ける脆性はりのせん断破壊について

ON THE SHEAR FRACTURE OF BRITTLE BEAM SUBJECTED TO IMPACT FORCE

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)

**広島大学工学部大学院 構造工学専攻(〒739 東広島市鏡山1-4-1)

キーワード：衝撃破壊, せん断破壊, 破壊過程, 脆性はり

(impact fracture, shear fracture, fracture process, brittle beam)

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、多くの犠牲者を出すと共に橋梁、鉄道、港湾施設、地下鉄、地下埋設管、堤防などの土木構造物に広範で多様な大被害を発生させ、長期にわたり都市機能を麻痺させた。地震後まもなく発行された多くの地震被害報告書にこれらの被害の状況が細かく述べられている。さらに、今日まで各分野の専門家により、土木構造物が受けた被害の原因をはじめ補強法や今後の耐震設計法などが積極的に研究されている。

しかし、このたびのいわゆる内陸直下型地震に特有の被害形態も多く、たとえば、RC橋脚などの水平全周クラックの例や、せん断力が卓越して脆性的に破壊したと思われる場合など、破壊メカニズムが容易に解明できない現象も多く、これらについては現在も研究途上にあり、様々なアプローチが試みられている¹⁾。また、地震記録そのものも被害現場で直接測定された例は少なく、地震入力を正確に確定することも困難である。

ここでは、まず、地震力に対するアプローチの一つとして、現在の強震計では計測されない地震衝撃力が構造物に作用した可能性を考え、その衝撃力によって破壊した場合があると考える。次いで、横衝撃荷重を受ける脆性はりが曲げモーメントとせん断力が共存する場で破壊する場合、すなわち、モードIとモードIIが同時に存在する複合モード下の破壊過程を、動光弾性実験と数値解析により検討する。

2. 動光弾性実験^{2, 3, 4)}

2.1 実験方法

脆性はりが複合モードで破壊する過程を可視化するために用いたCranz-Shardin型の動光弾性実験装置を図-1に示す。

この実験装置は光弾性光学系、光源系、トリガー系、荷重系、および撮影系で構成されている。

光源系は9個の閃光球(Xe放電管)を内蔵した閃光光源装置で、閃光時間が1.8μsの時発光出力5Ws/Flashである。

撮影系には、当研究室で制作した撮影装置に、ASA800のフルカラーフィルムを内蔵した9個の使い捨てカメラをセットして用いた。

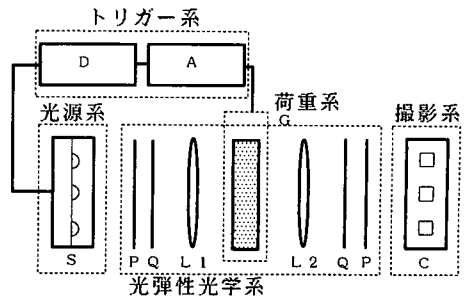


図-1 動光弾性実験装置

2.2 模型材料

以下に述べる脆性はり模型は、動光弾性実験に適用できるように、厚さ3mmのエポキシ樹脂(アラルダイトB)板から切り出した。表-1に本実験で用いた模型材料の動的性質を示す。

(1)はり模型Ⅰ

はり模型Ⅰは、一端を固定し、他端の回転を拘束したまま上下方向に移動できるように支持したはりで、移動端の上縁に横衝撃荷重を与える。

図-2にはり模型Ⅰを示す。

はりのスパン中央の上縁に切欠きを持ち、固定端側は、はり端から3cmの上下縁を鋼金具で拘束し、上縁に衝撃力を受ける移動端側は、逆し型の鋼金具が支持装置の溝に沿ってたわみ角を拘束したまま上下方向のみに移動できるようにしている。もし、移動端の回転が完全に拘束できれば、はり中央断面では曲げ応力よりせん断応力が卓越する。

(2)はり模型Ⅱ

図-3にはり模型Ⅱを示す。この模型ははり模型Ⅰと同じ断面の単純はりで、スパン中央下縁に切欠きを持ち、スパンの1/3の上縁に衝撃力が与えられる。したがって、下縁の曲げ応力で亀裂が開始した後はり高中央付近ではせん断応力と曲げ応力が存在する場での亀裂進展が行われる。

表-1 模型材料の動的性質

縦波速度 C_P (m/s)	横波速度 C_T (m/s)	縦弾性係数 E_D (GPa)	せん断弾性 係数 G_D (GPa)	ポアソン比 ν_D	密度 ρ (t/m ³)
1,909	995	3.448	1.184	0.45	1.22

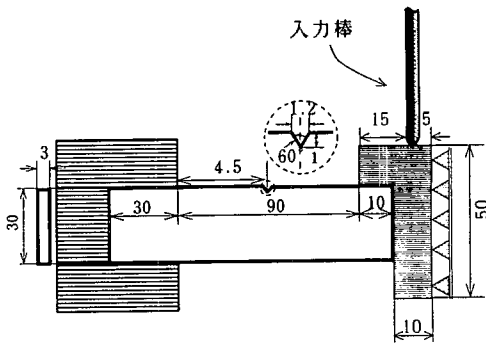


図-2 はり模型Ⅰ(単位mm)

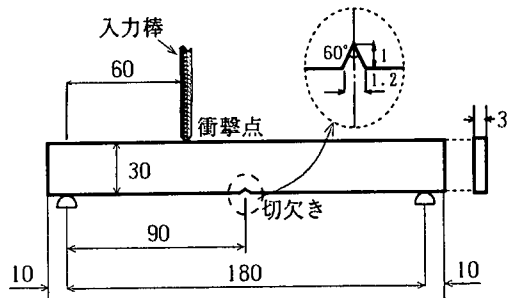


図-3 はり模型Ⅱ(単位mm)

2.3 衝撃方法と衝撃力

両はり模型へは、はりの衝撃点に垂直におかれた丸鋼の入力棒を介して衝撃力を与えた。入力棒の上端には鋼落錘による衝撃を行い、入力棒の下端から等間隔に2箇所に着着されたひずみゲージの動ひずみ波形によりはり模型への衝撃力を測定する。

表-2に各はり模型に対する入力棒と衝撃条件およびはりへの衝撃継続時間を示す。

表-2 入力棒と衝撃条件

	入力棒の長さ	入力棒の直径	落錘重量	衝撃速度	衝撃継続時間
はり模型Ⅰ	650mm	6mm	907.0gf	4.85m/s	約 250 μ s
はり模型Ⅱ	850mm	6mm	286.5gf	1.98m/s	約1,000 μ s

図-4, 5に, それぞれのはり模型に対する衝撃力を示す. ただし, 図-4は破壊時の波形であるが, 図-5は切欠きを設けていないはり模型Ⅱに対する波形で, はりが破壊しない場合のものである. はり模型Ⅰへの衝撃力の最大値は, はり模型Ⅱへのその約10倍である.

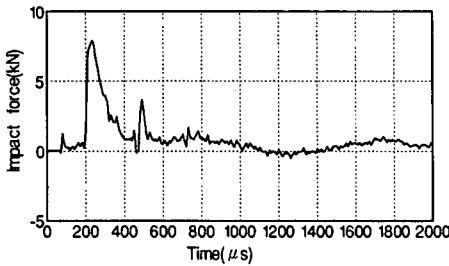


図-4 はり模型Ⅰへの衝撃力

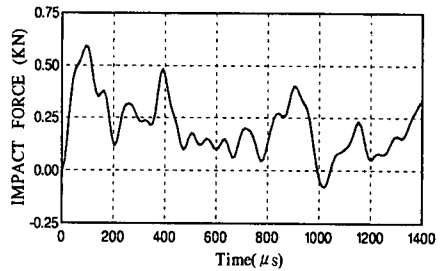


図-5 はり模型Ⅱへの衝撃力

図-4によると, はり模型Ⅰへの衝撃力の最初のピークを含む主パルスの継続時間は約250 μs であり, 入力棒内を往復する縦波により第2のピークが現れ全体では約600 μs まで継続している. また, 図-5では, はり模型Ⅱ内で両端からの距離が異なって往復する曲げ波と入力棒内の縦波とが干渉し, 衝撃力の主要部分で4~5個のピークを持つかなり複雑な波形となっている.

2.4 動光弾性写真

(1) はり模型Ⅰ

図-6, 7に, はり模型Ⅰに対する動光弾性写真を示す. なお, 各写真の時刻ははりへの衝撃力が作用し始めた時間からの値(μs)である.

図-6と7の縞模様から判断すると, どちらの場合も固定端からスパンの2/3の距離までは上下縁で最大の縞次数となり, 曲げモーメントが卓越することが示され, 衝撃点から約1.5cm左の断面では上下縁で零, はり高中央で最大の縞次数が現れ, せん断力が卓越することが示されている. また, き裂進展開始時には移動端の逆し型金具とはり端との接合面の一部が分離することを示す縞模様があり, 移動端は予定通りの拘束状態になくたわみ角が生じている.

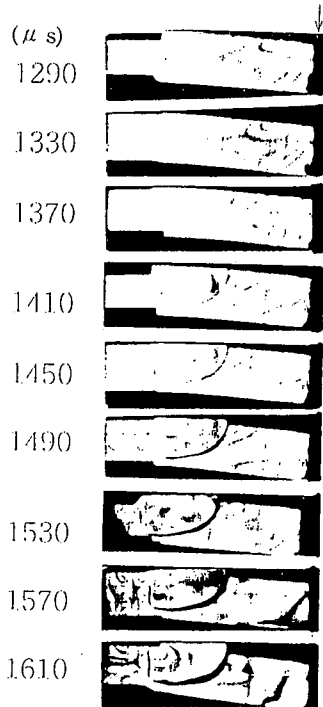


図-6 はり模型Ⅰの
動光弾性写真

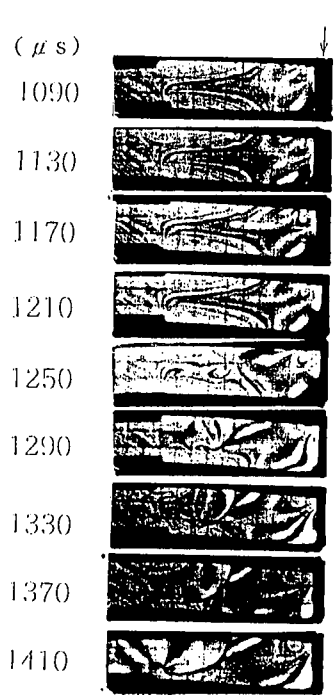


図-7 はり模型Ⅰの
動光弾性写真

図-6では, 1,330 μs と1,370 μs の間ではり上縁の切欠き先端からき裂進展が開始し, モードⅠのき裂がほぼはり軸直角方向に進展するが, はり高中央に近づくときせん断応力が卓越するため複合モードとなり固定端側に向かって緩やかに曲がりながら進展する. はりが破断する直前には曲進するき裂がはり下縁に近づき, 固定部分の中にも進行

した後再び上方へ曲進して破断する。図-7では、1,210 μ sから1,250 μ sでき裂が開始する以外は図-6の場合とほぼ同じ経路で進展する。

約40本のはり模型に対する破壊き裂のパターンは、図-6, 7の場合とほぼ同様であった。

図-8, 9に、それぞれの動光弾性写真から読みとったき裂パターンと各動間の平均のき裂進展速度を示す。

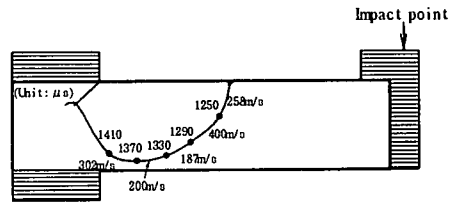
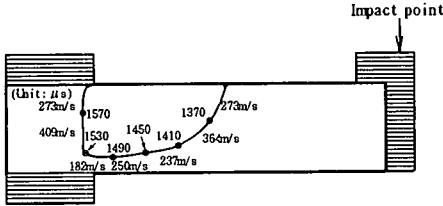


図-8 図-6のき裂パターンとき裂進展速度

図-9 図-7のき裂パターンとき裂進展速度

両者とも、き裂進展開始からはり高中央付近まではき裂進展速度が増加し、図-6では362.8m/s、図-7では399.5m/sとなる。その後、き裂進展速度は減少し固定端に達する直前では約180m/sとなる。

(2)はり模型Ⅱ

はり模型Ⅱでは、曲げ応力による開口モード（モードⅠ）とせん断応力によるモードⅡが混合した複合モードの破壊過程を調べるために、単純ばりのスパン長の1/3点に衝撃力を与えた。

図-10, 11に、はり模型Ⅱに対する動光弾性写真を示す。各写真の時刻ははり模型Ⅱの場合と同様である。

図-10では、960~980 μ sの間でき裂が発生し、980~1,040 μ sまでは衝撃点方向に緩やかに曲進し、1,060 μ sからS字状に破断している。

き裂開始時はスパン全体が下に凸の曲げ応力状態であるが、衝撃点側の曲げ応力が若干大きい。その後き裂が進展するにつれ、はり内の応力はスパン中央の右側から解放される。1,060 μ sで、

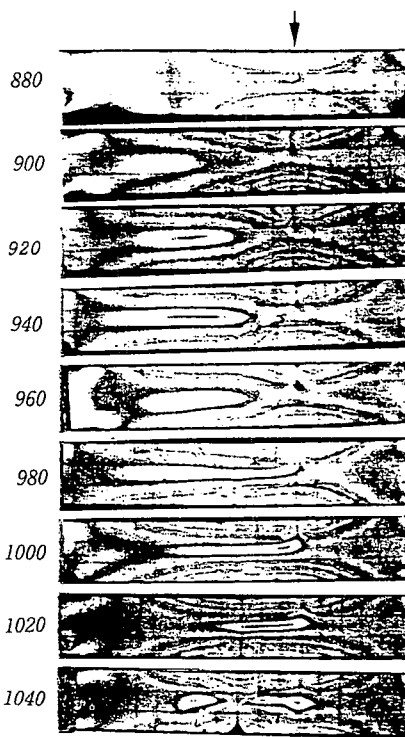


図-10 はり模型Ⅱの動光弾性写真

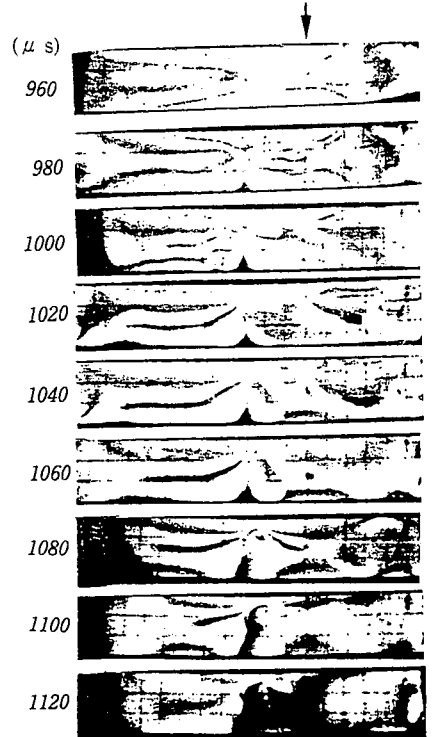


図-11 はり模型Ⅱの動光弾性写真

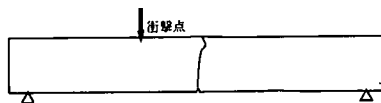


図-12 図-10のき裂進展パターン



図-13 図-11のき裂進展パターン

き裂が衝撃点側に急激に曲がり、はりの中立軸とほぼ平行に進展し、明らかにモードⅡが卓越した状態である。その後、 $120\mu\text{s}$ で、有効はり高が減少するためS字状に破断している。図-11も図-10の場合とほぼ同様である。

図-10, 11に対するき裂進展パターンを図-12, 13を示す。

3. はり模型Ⅱの解析

ここでは、はり模型Ⅱの衝撃応答と破壊に対する破壊靱性を推定するために、有限要素法を用いてき裂開始時までのたわみ曲線と切欠き先端の応力拡大係数を計算した。なお、入力として図-5に示した衝撃力を与えた。

図-12に、はりの中立軸におけるたわみ曲線を衝撃後の時間に対して示す。この図から、はり中央部でのたわみが最大となる断面は、曲げ波の伝播とともに衝撃点直下から次第にスパン中央より右側に移動し、時間の経過と共に再びスパン中央より左側に移動する。この間切欠きのあるスパン中央のたわみが最初に大きくなる時刻は、 $400\mu\text{s}$ 付近である。この時刻は、衝撃力の第1のピークで発生した曲げ波が、両端の支点でそれぞれの反射曲げ波がスパン中央で重なり合うときである。その後、再びスパン中央部のたわみが最大となる時刻は $800\mu\text{s}$ 付近である。これは、それぞれの反射波が再度両支点で反射し、スパン中央部で重なり合う時刻である。

図-13に、はり模型Ⅱのスパンの1/3点を衝撃した場合と、スパンの中央を衝撃した場合の応力拡大係数を比較して示す。後者は、はりのスパンに対して対称な衝撃であり、左右の支点からの反射曲げ波が同時にスパン中央で重なり合うので、切欠き先端の応力拡大係数は局所的に明瞭で大きなピークを形成しながら増加するが、後者は、衝撃点から両支点までの距離が異なるため、反射曲げ波がスパン中央に到達する時刻が違い、反射曲げ波が重なり合う断面が一定しない。そのため、前者の応力拡大係数は、後者のように局所的なピークが大きくなく、実験的にき裂開始に再現性が得られにくい原因となる。本実験の図-10, 11に示す動光弾性実験から求められたき裂開始時間は、図-11の応力拡大係数が最大値を取る時間でない原因の一つにもなっていると考えられる。

3. まとめ

- (1) はりが複合モードで破壊する場合の2種類の実験を行ったが、ともにき裂進展開始時は、はり縁の曲げ応力によるモードⅠでき裂が進展し、き裂の進展に伴うはり高中央部のせん断応力によるモードⅡとの複合でき裂が曲進する。
- (2) 十分な衝撃力を与えたはり模型Ⅰの場合、破壊き裂のパターンに再現性が得られやすいが、たわみ角を拘束する移動端の条件が満足されていない。
- (3) はりの破壊に丁度間に合う程度の衝撃力を与えたはり模型Ⅱの場合、曲げ波の伝播と反射によって支配される応力拡大係数の変化が、スパンの中央を衝撃した場合に比べ滑らかである。実験での、破壊開始時刻に再現性が得られにくい。

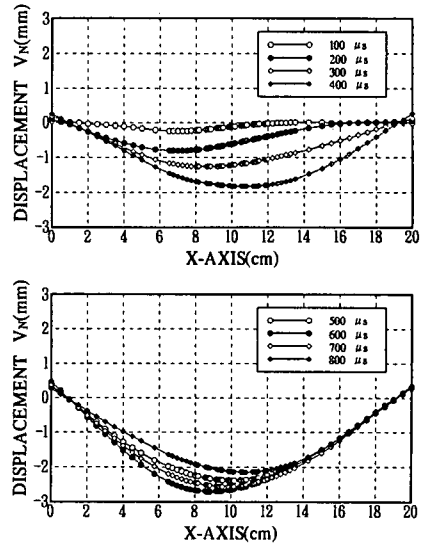


図-12 はり模型Ⅱのたわみ曲線

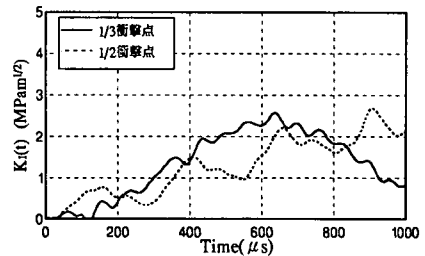


図-13 切欠き先端の応力拡大係数

4. 参考文献

- 1)佐藤誠, 田澤栄一, 川上直也: 鉄筋コンクリート煙突の崩壊メカニズムと地震力について, 阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集, pp. 347-354, 1996.
- 2)佐藤誠, 高橋江助: 衝撃力を考慮した脆性はりの衝撃破壊, 構造工学論文集42A, 1996年(投稿中)
- 3)M.Satoh: Dynamic fracture process of brittle beam subjected to impact force, Proc. Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures, pp.401-408, 1996.
- 4)佐藤誠, 西谷真吾: 脆性はりの衝撃破壊実験および解析, 日本光弾性学会第17回研究発表講演論文集, No. 17, pp. 97-100, 1995.