動光弾性実験装置と動的応力集中について

柴 原 正 雄* 佐々木 和 正** 吉 田 敏 雄***

Dynamic Photoelastic Apparatus and Dynamic Stress Concentration

by

Masao SHIBAHARA, Kazumasa SASAKI and Toshio YOSHIDA

Abstract

Hitherto, some experimental studies to explain the stress wave propagations and the dynamic stress distributions have been tried on the base of photoelasticity with the aid of high speed camera or stroboflash, and on the other hand, by using the strain gages. But, they have not been discussed from a point of view of characteristics of the incident stress wave.

Therefore, in this paper, the dynamic photoelastic method by repeating with the use of strobo flash light was adopted, and the shapes of the incident stress waves in rectangular specimens of two kinds of materials and the dynamic stress concentration phenomena at the circular holes and both sides semi-circular notched portions were studied in giving striker three kinds of steel plates as the dropped body.

As the result of experiments, it may be concluded that the shapes of the incident stress waves vary with the profile of the contact surface of the striker and the dynamic stress concentration factors are larger than the static factors for the flat end striker, especially during the primary period of the impact. And the other hand, for the pointed-head striker, the dynamic stress concentration factors are smaller than the statical that.

1. まえがき

機械や構造物には常に多かれ少なかれ衝撃荷重が作用し，時にはこれが原因となって思わぬ損傷を来たすことがあり，衝撃負荷による応力の解析は非常に重要な問題である。特に，円孔あるいは切欠きをもつ弾性体では，応力波は境界面で反射または回折されて応力集中を生ずるが，その状況が静的負荷の場合に比較していかに相異するものであるかを調べることは，重要な問題であるとともに興味深いところである。

応力解析に対する光弾的手法は，静的問題で知られているように，ひずみ計などによる[1)~4)]よりも広い領域内における応力状態が把握観測できる点に優位性をもち，衝撃問題に適用する動光弾性手法においても，その観測，記録が応力波の伝ぱ現象によく追随するならば，その優位性は確保されるわけである。この意味において，従来光弾性実験の試み[5)~10)]も行なわれてはいるが，入射応力波の

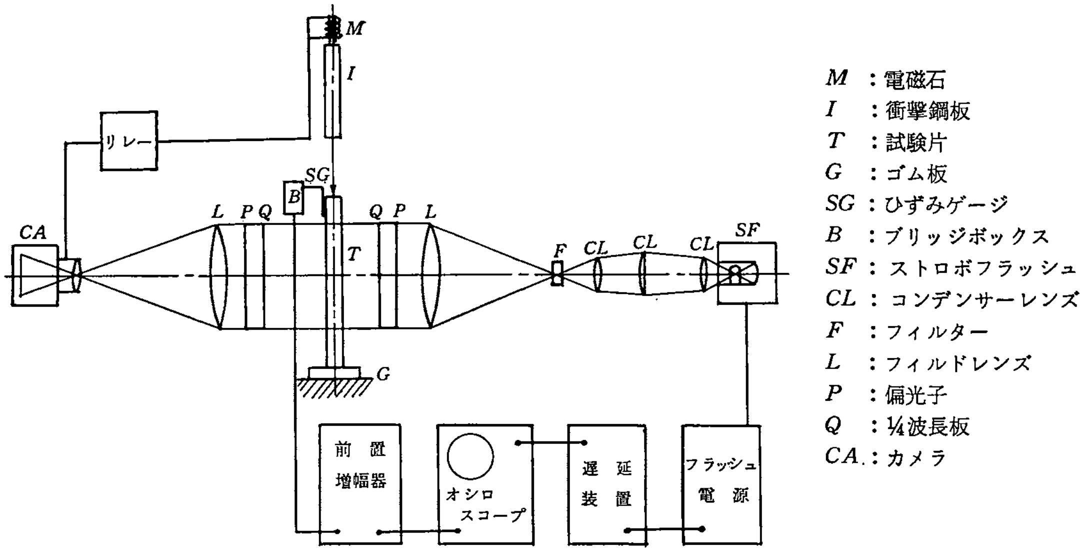
*機械工学科 **松下電産㈱産機事業本部 ***大学院学生

しま分布特性と関連して論じられたことは少ないようである。

本研究はストロボフラッシュを光源とした繰返し法の適用できる動光弾性実験装置を試作し，これにより，硬軟2種類の帯板試験片に衝撃端面形状が3種類に変化した落下鋼板で縦圧縮衝撃を与え，平滑材における入射応力波のしま分布をそれぞれまず吟味し，次に中央部に半径の異なる円孔と切欠きをもつ場合のしま分布を検討し，それら各場合における動的応力の伝ぱと集中に関する状況と変化を明らかにしたものである。

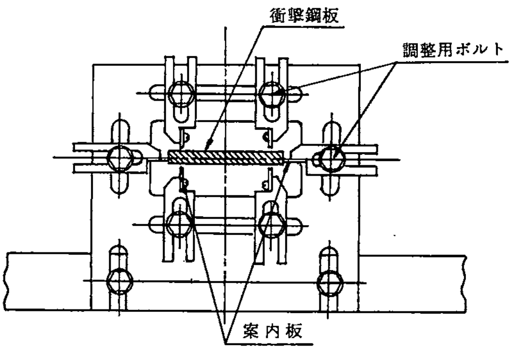
2. 実 験 装 置

本研究に用いた実験装置のブロック線図を第1図に示す。装置全体は暗室に設けられ，長目にセットされたカメラのシャッターを切れば電磁リレーが作用し，負荷塔上部で衝撃落下鋼板を釣り下げて



第1図　実 験 装 置 概 略 図

いる電磁石が切れる。その瞬間，衝撃落下板は負荷塔の案内板に沿って自然落下し，下部に垂直に保持されている試験片の上端面に衝撃力を加えることになる。負荷塔本体は，100×50 みぞ形鋼を使用した高さ2500mm の2本の主柱と，これを支える底材，2本の足材および，これら相互を強固に結合する添え板との組合せによる足まわり，さらに主柱上部の頭材と添え板とで剛節節点フレームを構築したものである。なお床面から 920mm の位置および上端近くには横けたを渡し，試験片の保持台および落下板釣り下げ用電磁石設置けたとした。もちろんこの位置は任意の高さに調整可能のものである。



第2図　衝撃鋼板案内装置

次に，落下板の落下再現性を確保するための装置として第2図に示す案内装置を作製した。これは厚さ 1 mm の高張力アルミニウム板を保持する保持子とこれを固定する調整用ボルトからなるもので，衝撃板がこれに沿って垂直に落下するように，また摩擦が少なく，しかも間隙によるがたも少ない最良の状態に調整しうるものである。この案内装置は試験片を垂直に保持する上下チャック部にも適用した。なお試験片の下端と支持台の間には厚さ 15mm のゴムシートを敷いて下端を自由端に近い状態とし，かつ下端の小穴にはひもを通して支持台に固定して跳ね上りを防止した。

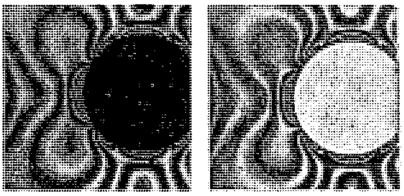
さて，落下板の試験片上端面への衝突により，試験片には縦圧縮応力波が発生し，下方へと伝ぱする。この応力波がまず試験片の上端より 145mm の位置に貼付されたトリガー用ひずみゲージの位置に到達したときひずみゲージ（標点長さ 3 mm）は応力波を検出し，ブリッジボックスで電圧変化に変えられ，前置増幅器で増幅されてオシロスコープにはいる。オシロスコープは単掃引にセットされており，電圧がある一定量変化したとき，すなわちひずみが一定量に達したときに掃引されて入射応力波が観察され，繰返し負荷の都度，この波形を観察することによって負荷の再現性を容易に吟味することができる。さらにオシロスコープからのゲート出力を遅延装置の入力とし，この遅延装置によって応力波がひずみゲージの位置から目的とする任意の位置に来るまでの時間を適宜遅らせて光源を発光させることが可能となる。遅延時間を順次増加させて実験を繰返せば一連の連続写真が得られ，応力波の伝ぱや集中の状況を写真の視野全般にわたって観察することができるわけである。

光弾性しまの観察は，応力波が試験片長さのほぼ中央に到達したときに行なうため，トリガーはできるだけ試験片中央に近い位置で行なわれることが望ましい。よって本実験では前記のように試片上端面より 145mm(後に切欠きをつける位置より 70mm 上端寄り)で偏光場にはいる僅か手前の位置の試験片両面にひずみゲージを貼付し，2 枚ゲージ法によることとしたものである。なおブリッジボックスには直流 6 V を供給し，前置増幅器としては広帯域増幅器が，また遅延装置には 10μ sec～ 1 sec まで任意に調節可能なリターダーを用いたが，本実験では 10μsec～ 100μsec および 0.1msec～ 1 msec の 2 種類の遅延レンジを使用した。

動光弾性実験では現象がごく短時間内で発生するため，光源の閃光時間とその光量に問題のあることはもちろんであるが，本装置にはクセノン放電管を用いたマイクロフラッシュを使用した。閃光時間は 0.7μsec（半値巾），発生出力は 0.3Wsec（公称値）であるが，単色光の強い光源が望まれる本実験に対し，クセノン放電光は 475mμ をピーク値とする連続スペクトル光であるため，非金属干渉フィルターをそう入，使用した。これは採用波長が従来の水銀燈と等しく 546±25mμ で，クセノン放電光のピーク値と僅かにずれてはいるが，透過率は81%ときわめて良好であるため，他の色フィルターとは比較にならないほど明るく，動光弾性実験で起こりがちな光量不足を一挙に解決したものである。3 枚のコンデンサーレンズで光を集束させた以外の光学系は静的光弾性実験で用いられる 150mm$^{\phi}$ 視野のものである。カメラには一眼レフで焦点距離 135mm，F2.5 の望遠レンズを使用し，絞りを 3.5，露出時間セットは 1 秒，またフィルムは TRI-X を用い，パンドールで 20°C，25分間の増感現像とした。フィルム上での像は実物の約⅓に縮少撮影されているが，これを約 5 倍に引伸し焼付けしてしま次数分布の解析に用いた。なお零次のしまの確認や，色比較法などのためには色写真が必要であるが，この際にはフィルターを除去し，フィルムにハイスピード・エクタクロムを使用すれば十分良好なカラースライドが上記撮影条件で得られることも確認された。

本実験で採用した繰返し法の適用性は負荷の再現性とトリガー精度によって左右されるものであり，この点に関する吟味が必要である。よってその一検定として，30μsec の設定遅延時間に対して衝撃落下板を一定高さから多数回試験片に落下させ，応力波頭近傍のしま写真をフィルム 1 本分撮影して一次のしまの発生位置を測定し，そのばらつきを求めて吟味を行なってみた。その結果，標準偏

差は 2.10mm で，応力波の伝ぱ速度 1800m/sec に対してこれは 1.2μsec に相当するばらつきである。正規分布を仮定すれば ±3μsec 以内に 99%がはいり，かなり良好な結果を示すものといえる。さらに入射応力波の大きさと形状の相違が打撃ごとに生じないことが必要で，これはトリガー用ひずみゲージでオシロスコープに描かれたものを打撃ごとに連続撮影し，それらを比較検討することによってほぼ完全に再現性のあることが吟味，確認でき，さらに一方，切欠き試験片では集中応力を測定するため，暗明両視野の写真を撮影するものであるが，この両写真を切欠きを基準にして重ねれば，一方のしまとしまの間に他方のしまが完全にはいることから，両場合における打撃によって生じた応力波の値と波形分布に差がなく，負荷の再現性とトリガー精度の両者とも良好であることが十分推定できるわけである。第3図はそれらの結果を示すものである。なお，同一落下板で同一高さから同一材料，同一寸法の異なる試験片を打撃したとき発生する応力波の大きさと波形に相違が生じてもいけないわけで，これについても先端平坦の落下板によって生ずる1次のしまが山形状模様を呈する特性を利用して吟味し，それらの再現性が十分確保されているものであることを確認することができた。



第3図　動的光弾性写真の再現性

以上の吟味検討により，本実験装置のシステムは繰返し法を適用するに十分な精度と再現性を持っているものであることが明らかにされ，動光弾性実験装置として応力波の伝ぱ状況や応力集中に関する動的諸問題の解析に使用できるものであるといえる。

3. 試験片と衝撃落下板

試験片とする光弾性材料には，エポキシポリサルファイド共重合体を用いた。従来の実験では比較的長い撮影露出時間でもしまの解像度が低下しないように応力波の伝ぱ速度の遅い，すなわち縦弾性係数の低い材料を試料として用いることが多かったようであるが[11)~14)]，かかる材料では鋼材を伝ぱする応力波と相似性を異にする傾向が大きく，好ましいことではない。本実験装置では前記のように，かなり速い伝ぱ速度の場合でもよく追随し，光弾性しまの解像度には何ら問題を生じないため，必要な延性を保持し，かつできるだけ高い縦弾性係数を持つものと，一方軟らかい材料に対するものの両場合の実験を実施するため第1表の重量混合比を持つ材料Ⅰ，Ⅱを対象とすることにした。

第1表　供試材料の重量混合比

材料	エポキシプレポリマー (エピコート 828)	ポリサルファイド (チオコール LP-3)	硬化剤 (ジエチレントリアミン)
Ⅰ	100	15	8
Ⅱ	100	40	10

第2表　供試材料の物性値

材料	縦弾性係数 (kg/mm^2)	光弾性感度 (mm/kg)	ポアソン比	比重
Ⅰ	350	1.20	0.45	1.2
Ⅱ	205	0.92	0.48	1.2

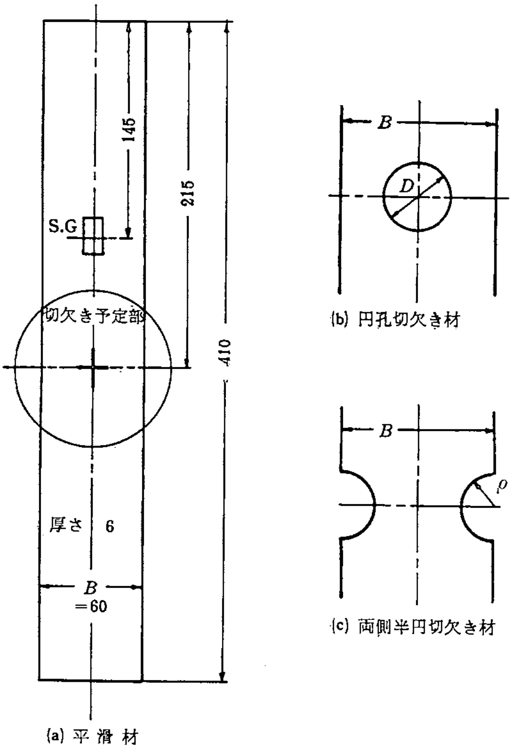
試験片用素材の優劣は本研究にとってきわめて重要な因子となるため，その製作には十分な留意が払われた。鋳形にはセロファン紙をはった2枚のガラス板を6mm 間隔に保持したものを利用し，硬化後，必要な試験片形状寸法に周辺部を加工仕上げた。この際，落下打撃板が衝突する端面の直角度や平坦度には特に十分な注意が払われている。第2表には得られた供試材料の物性値を示す。試験片としては平滑材と円孔切欠き材および両側半円切欠き材の3種類を用い，その形状，寸法を第4図および第3表に示す。平滑材では入射応力波形を，円孔および両側半円切欠き材では動的応力集中現象を調べた。また衝撃落下鋼板の形状，寸法を第5図に示す。A形は試験片の上端全面に一様な衝撃負

第3表　切欠き試験片の寸法比

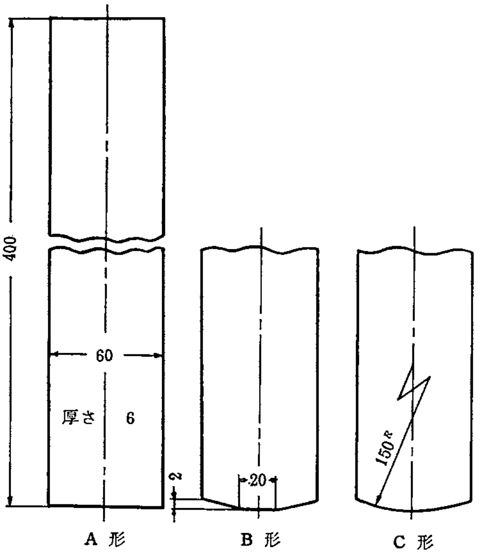
材　料	D/B （円孔）			$2\rho/B$(半円)
I	0.33	0.42	0.47	0.41
II	0.33	0.42	0.47	0.42

第4表　応力波の伝ぱ速度(km/s)

材　料	c	c_0	c_3
I	1.84	1.71	1.91
II	1.81	1.46	2.78



第4図　試験片の形状・寸法



第5図　衝撃鋼板の形状・寸法

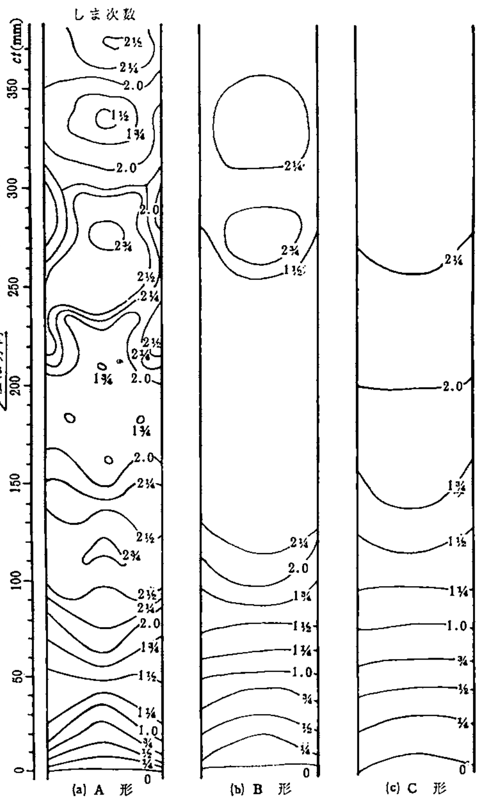
荷が加わるように端面を一様平坦面としたものであり，B形は板幅の中央⅓のみで衝撃負荷を与えるもの，C形は丸端で中央に集中荷重として負荷するようにしたものである。各試験片に対して，これら3種の衝撃鋼板を落下作用させて入射応力波形および動的応力集中現象の比較検討を行なった。なおI，II 各材での入射応力波の伝ぱ速度 c は，しま写真の零次のしま移動速度より測定し，また帯板を無限に細い棒と考えた場合と半無限体と考えた場合の応力波の理論伝ぱ速度 $c_0=\sqrt{E/\rho}$，$c_3=c_0/\sqrt{1-\nu^2}$ を比較のため計算して第4表に示した。

4. 実 験 結 果

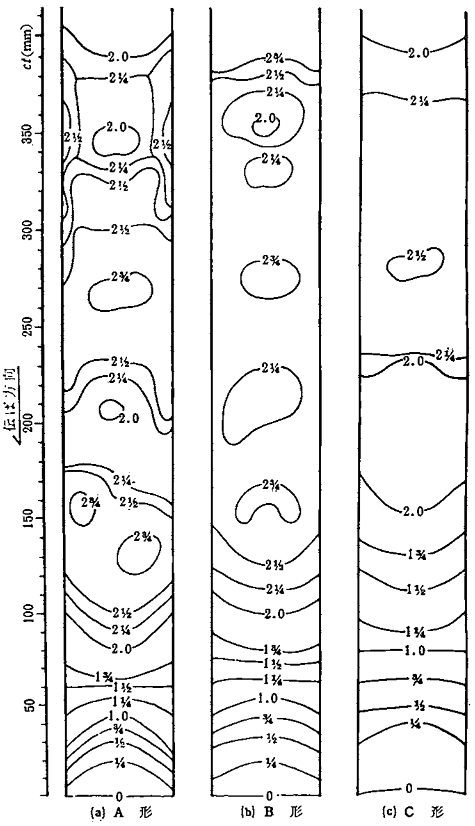
本研究では，まず第4図(a)に示した平滑材に，第5図で示した3種類の端面形状を有する落下衝撃鋼板を衝突させたときに生ずる縦圧縮応力波によるしま分布状態を調べ，ついで第4図(b)，(c)に示す円孔切欠き材および両側半切欠き材に上述の落下衝撃鋼板で衝撃負荷を与えたときの動的応力集中現象につき検討した。なお，本実験では落下高さはすべて 55cm の一定とした。

4.1 一端に縦圧縮衝撃負荷を受ける平滑材を伝ぱする応力波

平滑材における入射応力波の伝ぱ状況を示したのが第6，7図である。図は明暗視野写真を基に，一軸応力を仮定して Tardy 法で求めた $n \pm 1/4$ 次のしま写真を参考にして描いた切欠き予定部を通過する入射応力波のしま模様で図中の数字はしま次数である。いずれの場合もほぼ左右対称で荷重の



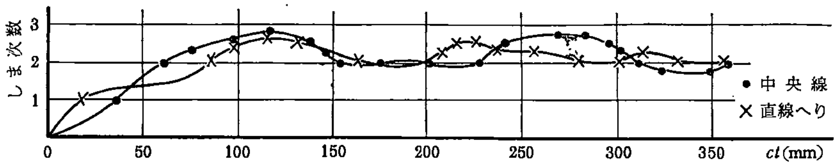
第6図 入射しま分布（I材）



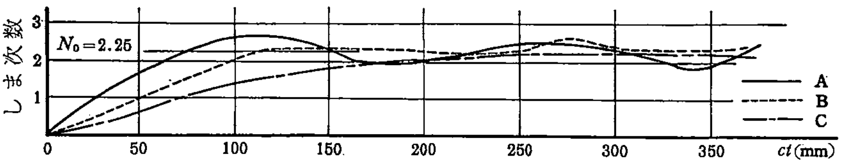
第7図 入射しま分布（II材）

不正による曲げや片当りなどはないと推定される。また材料I，IIとも定性的には同傾向を示しており，全面一様打撃のA形は集中荷重を受けるC形よりもしまの凹凸がはげしく，端面の⅓に衝撃負荷を受けるB形はこの中間的な様相を呈している。特にA形については，薄い帯板の端に急激な大きさ一定の等分布圧力が作用する問題を二次元動弾性理論に基づいて理論解析を行なった Jones & Ellis の結果[15] と定性的によく一致している。すなわち，応力値が高まるにつれてしまは伝ぱ方向に対して凹型から凸型に変化し，さらに閉じた曲線へと移行するような分布を示している。なお，厳密な意

味での比較には未だ問題はあろうが，I材については動的有限要素法[16]を用いても解析を行ない，0.4kg/mm² の主応力差が1次のしまに対応するものとみなせば，応力分布の計算値と実験結果とはほぼよく一致することも確かめられた。さてこのように，入射応力波の伝ぱにはそれぞれ特性のあることは明らかで，例えばI材のA形衝撃鋼板による入射応力波のしま次数の変動状況を，試験片の中心線上と直線へりの2個所につき示せば第8図のようになる。すなわち，入射応力波は左右対称ではあるが，同一横断面でも位置によってしま次数が変化していることは明らかである。これらの板幅全



第8図　入射応力波のしま次数の変化状態（I材，A形）

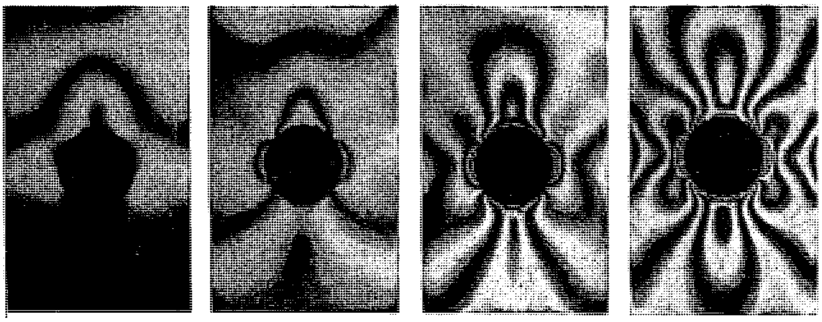


第9図　入射応力波のしま次数の変化状態（平均値，I材）

面での変化を平均したものの変動をI材につき図示したのが第9図である。II材も同傾向であり，A形によるものは入射応力波の二次的変動が大きく，C形によるものは単調増加で振動はほとんど見られない特性を示している。またしま次数を見れば，A，B，Cの順に減少するようであるが，II材ではB形によるものとA形によるものとの違いはあまり判然とせず，また立ち上りはII材の方がI材に比べて遅くなり，粘性の影響が強く現われている。後述する動的応力集中係数を求めるためには，入射応力波を定量的に表示することが必要であるが，入射応力波の特性が単純でない場合ほど十分な考慮が必要と思われる。特にA形の場合のように応力波が立ち上り後も大きく変動しながら経過時間とともに二次的にしま次数が変化する場合，立ち上り後のしま次数をいかに定義するかという問題があるが，ここでは一応平均値の二次的振動の中心をとり，平均しま次数をI材では $N_0=2.25$，II材では $N_0=2.3$ とすることとした。

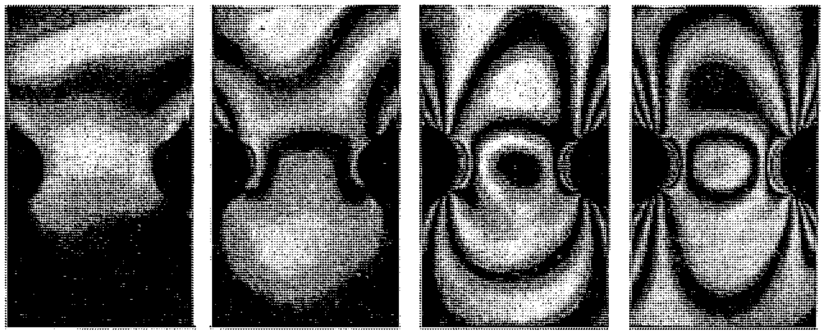
4.2　円孔および両側半円切欠き材による動的応力集中

円孔および両側半円切欠き材に対して撮影した光弾性しま写真例を第10，11図に示す。下記の数字は零次のしま波頭が各切欠きの入射側上端に到達したときを時間の基準にとった一般化された遅延時間である。第12図には $D/B=0.42$ の円孔切欠き底（$x/H=0.0$）と直線へり（$x/H=1.0$）でのしま次数の時間的変化をI材につき例示する。II材もほぼ同様の変化状況で，A形衝撃板によるものは大きく変動し，C形によるものは単調に増加している。B形についてはA形よりも変動は大きくはないが，しま次数に注目すればI材ではA形とC形の中間的な値となっているのに対し，II材ではA形にほぼ近い状況を示している。これは前述したように，II材ではB形による入射応力波がA形の場合とほぼ等しい状態を有しているためと考えられる。このことは他の円孔切欠き材でも同様の結果となっている。最小断面部でのしま次数分布の状況を第13図に例示する。断面全体にわたっての時間的変動の状況が明らかである。また，3種の円孔切欠き材における立ち上りを比較して見れば，I材では



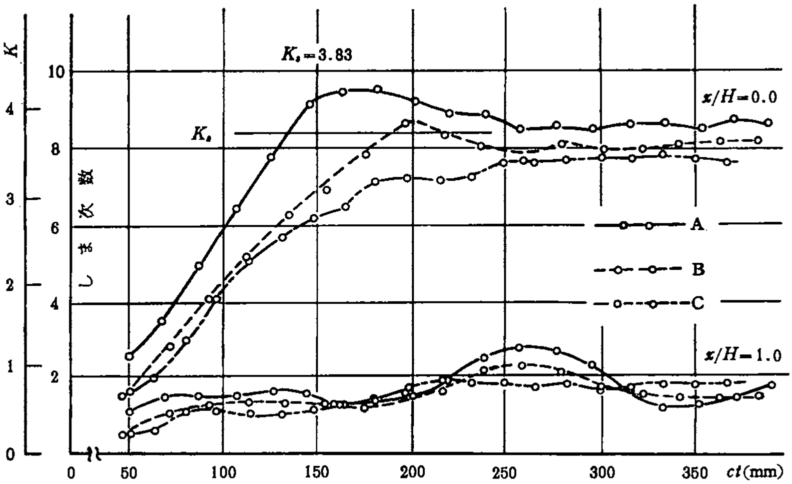
ct=29mm 66 102 337

第10図 円孔切欠き材の応力集中 (D/B=0.42, A形衝撃落下板, Ⅱ材)



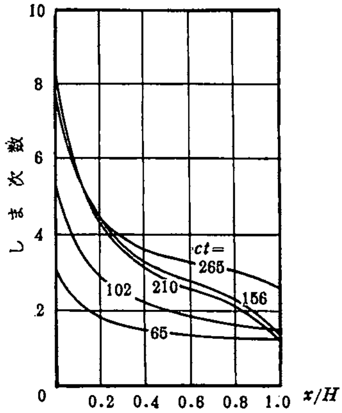
ct=41mm 68 140 302

第11図 両側半円欠き材の応力集中 ($2\rho/B$−0.42 A形衝撃落下鋼板, Ⅱ材)

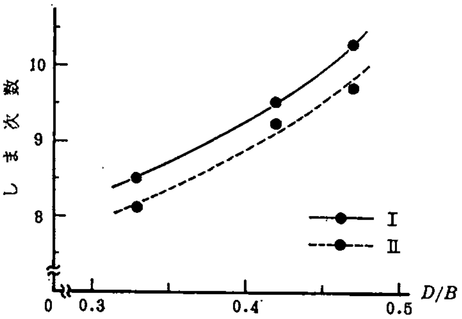


第12図 円孔切欠き最小断面部のしま次数分布 (D/B=0.42, Ⅰ材)

ct=150mm (平均値), Ⅱ材では 180mm (平均値) である。最高しま次数の孔径による変化を比較したものを第14図に示す。図より, 孔径増大によるしま次数の増加傾向と硬軟両試料における材料特性が現われていることは明らかである。

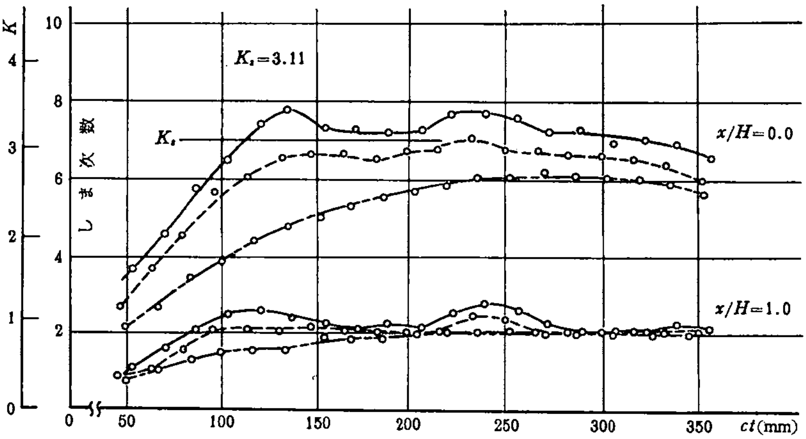


第13図　最小断面部でのしま次数分布
（Ⅱ材，A形，$D/B=0.42$）



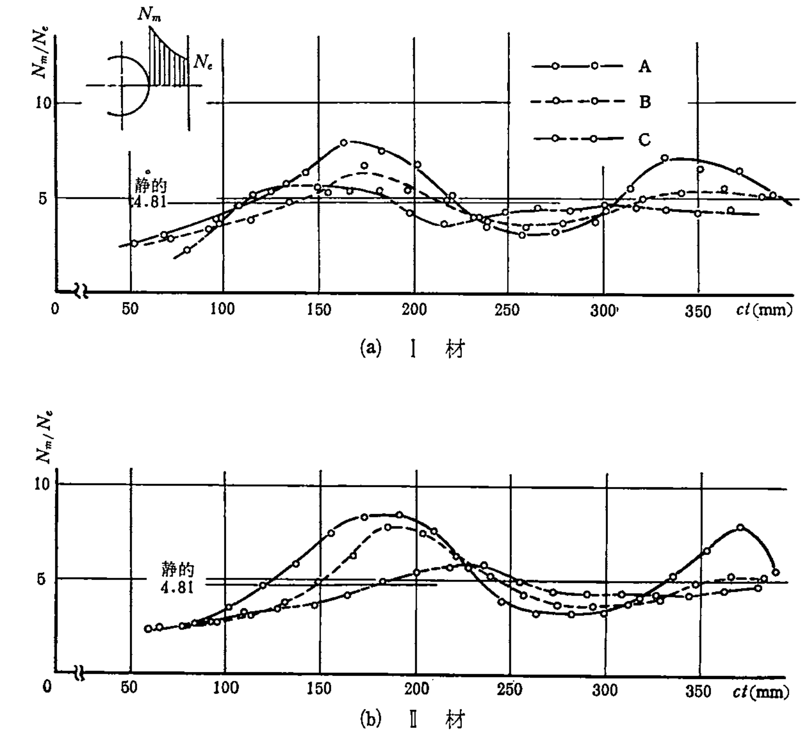
第14図　最高しま次数の比較

次に，両側半円切欠き材については，切欠き底（$x/H=0.0$）と中心線上（$x/H=1.0$）でのしま次数の時間的変化を第15図に例示した。この場合も円孔切欠き材と同様の傾向があり，最高しま次数もⅠ材の方がⅡ材よりやや高目となっており，立ち上りもⅡ材の方が遅くなっている。

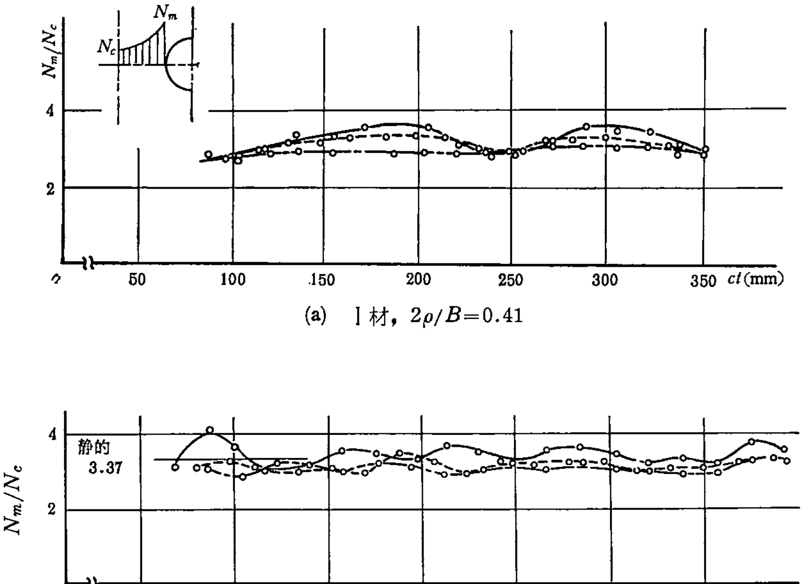


第15図　両側半円切欠き最小断面部のしま次数変化（$2\rho/B=0.41$，Ⅰ材）

切欠き最小断面部のしま次数の変動を見る一手法として，円孔切欠き材については切欠き底のしま次数（N_m）を直線へりでのしま次数（N_e）で除した値の時間的変動を求めてみたのが第16図である，図中に記してある実線は Howland の解[17] による静的な場合の値である。Ⅰ，Ⅱ材ともA形によるものは時間の経過につれて静的な値の上下を大きく変動しているのに対し，C形によるものは変動が少なく，B形によるものについてはその中間的な様相を呈している。これらの傾向は他の孔径比の場合についても同様である。また，両側半円切欠き材については，切欠き底のしま次数（N_m）と試験片の中心線上のしま次数（N_c）の比の変動を第17図(a)，(b)に示す。図中の実線は静的な引張試験より求めた静的な値である。Ⅰ，Ⅱ材ともA形によるものはB，C形に比較すれば変動の大きいことは上記と同様であるが，その変動量自身は円孔切欠き材に比べて僅少である。これは，直線へりでは境界の影響が強いのに対して，中心線上ではほとんど境界の影響がないため，直線へりでのしま次数を用



第16図　円孔切欠き部における N_m/N_e の変化 ($D/B=0.42$)



(b)　II 材，$2\rho/B=0.42$

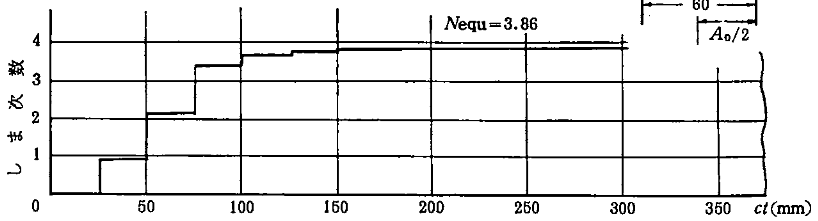
第17図　半円切欠き部における N_m/N_c の変化

いている円孔切欠き材における N_m/N_e の変動が中心線上でのしま次数を用いている半円切欠き材の場合の N_m/N_c の変動に比して大きくなるものと考えられる。

以上の結果より，最小断面部におけるしま次数の分布状態は，切欠きの種類や大きさに関係なくA形衝撃板による場合が時間的変動が最も大きく，C形によるものはほとんど変動しないということは，衝撃鋼板先端形状によって定まる入射応力波自身の変動特性に起因していることは明らかで，動的応力集中はこの事実に基づいて吟味されねばならないわけである。

さて，静的な応力集中係数を定義するためには，一般に公称応力として切欠き部の最小断面における平均応力を用いる場合と，切欠きがないと仮定した場合の平均応力を用いる場合とがある。静的な場合にはこれらの平均応力の合力は釣合い条件を満足しているのに対し，動的な場合には任意の断面における応力は応力波の伝ぱのために時間的に変動し，必ずしも静的な場合と同様な力の釣合い条件を満足してはいない。切欠き部においても応力波の一次元的伝ぱ現象が成立するものと仮定して，第18図に示す寸法の帯板に対し，(a)に示すようなステップ状の集合を入射応力波とし，0-0断面における応力の変動を求めれば(b)のようになる。図より十分時間が経過したときには，静的と同様な力の釣

(a)　ステップ状入射応力波（I材，A形）



(b)　0—0断面での応力変動

第18図　力の釣合い（Nequ：静的と同様な釣合い，$N\text{equ}=N_0\dfrac{A_0}{A_1}$）

合い条件を満足していることがわかる。ここで本実験の入射応力波は供試材の横軸方向に変化をせずに一次元的に第18図(a)に示すような時間的変動をするものとし，切欠き底における最大しま次数 N_{max} を立ち上り後のしま次数 N_0 で除した値 $K_d=N_{max}/N_0$ を動的応力集中係数と定義すれば，切欠きがないと仮定したときの平均応力を公称応力とした場合の静的応力集中係数と比較することができる。ここの N_0 としては，前述のごとく第9図に示したように板幅方向での平均値の二次的振動の中心のしま次数を用いることとした。第12，15図の縦軸にこの意味での $N_m/N_0=K$ を並記し，その時間的変動を示した。図中に示す静的な集中係数 K_s としては，円孔切欠き材の場合は Howland の解[17]を，両側半円切欠き材については石田の解[18]を用いたものである。切欠きの種類や大きさに関係なく，動的な応力集中 K が時間的に変動し，またそれが各種衝撃鋼板による入射応力波の特性に大きな依存性を示すものであることは，さきにしま次数の変化につき述べたとおりの状況となるものであるが，ここでさらに静的な応力集中係数を上廻ることのある事実が，集中負荷の場合ではなくて一様負荷の場合において現われたことは特に注目すべきことである。

5. 結　　　　言

本研究では，衝撃荷重として落下鋼板を試験片上端面に与えて縦圧縮衝撃を加え，光源にはマイクロフラッシュを用いて繰返し法の適用できる動光弾性実験装置を製作し，供試光弾性材料として縦弾性係数が高くて硬いエポキシ樹脂と軟らかいエポキシ樹脂とを用い，また衝撃落下板の接触端面形状による入射応力波の違いや切欠き材での動的応力集中現象の違いを研究した。以下に得られた成果を示す。

1.衝撃落下鋼板の衝撃端面の形状により，入射応力波の形状が相違するものである。すなわち，硬軟両材とも全面接触したものは立ち上り後の二次的変動が大きく，中央部のみで接触負荷したものは立ち上り後の二次的変動はほとんどなくなめらかであり，しま次数も低い。また，板幅の⅓のみの接触によるものはほぼその中間的様相を呈するものであるが，軟質材では全面接触の場合に近い結果を示した。2. 切欠き部にこれらの応力波が入射したとき,全面接触による場合は切欠き最小断面部のしま分布は，静的な分布と異なる様相である。ただし，中央部のみで接触負荷される場合は静的な分布との差は少ない。 3. 切欠き材の切欠き底に生ずる最大しま次数を平滑材に入射した場合の平均しま次数で除したものを動的応力集中係数と定義し，これを求めて検討した。すなわち，$ct=0$～350mmの衝撃初期においては，材料の硬軟によらず全面接触負荷による場合は静的な係数よりも大きくなる（円孔の場合で約10%程度）時間があり，二次的な変動も大きい。この結果は従来の研究のうち一致するものもあるが，また相違するものもあるようである。[8),9)] それに対し，中央部のみでの接触負荷の場合は二次的変動はほとんどなく，時間の経過とともに単調増加の傾向を示し，動的応力集中係数は静的な値よりは低目である（円孔の場合で約5%程度)。これは入射応力波への依存性を示すものにほかならず，注目すべき点と思われる。また，⅓幅衝撃負荷の場合は，上記両場合のほぼ中間的状態である（円孔の場合，静的値よりは約5%程度大きい)。しかし軟質材での時間による変化状態は，どちらかといえば全面接触負荷の場合に近似し，また他の2種類の負荷条件の場合でも，動的集中係数値は硬質材におけるよりはやや小さ目に現われてくることが，円孔切欠きの場合につき明らかにうかがうことができる。 4. 試験片の材質，切欠きの種類・大きさおよび衝撃鋼板の衝撃端面の形状によらず，十分時間が経過すれば静的な場合の状態に近づく傾向がある。

終りに，実験実施ならびに図面作製に協力された大久保康造，岸正，堀芳樹の諸君，川本技官に感謝の意を表します。

参　考　文　献

1) R. Shea, Exp. Mech., 4-1 (1964), 20.
2) 松本，非破壊検査，18-8 (昭44)，343.
3) 松本，非破壊検査，20-5 (昭46)，246.
4) A. Chatani, S. Uchiyama and M. Shibahara, Proc. Fifteenth Japan Congress on Materials Research, (1972), 36.
5) D. A. Senior and A. A. Wells, Phil. Mag., Ser. 7, 37 (1946), 463.
6) A. J. Durelli and W. F. Riley, Trans. ASME, Ser. E, 28-2 (1961), 245, J. Appl. Phys., 32-7 (1961), 1255.
7) J. W. Dally, A. J. Durelli and W. F. Riley, Proc. SESA, 17-2 (1960), 33.
8) 河田・橋本，東大宇宙航空研究所報告，1-2 (1965)，69, JSME Semi-International Symposium, (1967), 111.
9) 河野・田口・島田，三菱重工技報，6-2 (昭44)，143.

10) 岡村・高野・三橋，機械学会論文集，**38**-310（昭47），1175.
11) A. J. Durelli, J. Appl. Mech., **23**-3 (1956), 482.
12) A. J. Durelli and W. F. Riley, J. Appl. Mech., **24**-1 (1957), 69.
13) J. W. Dally, W. F. Riley and A. J. Durelly, Trans. ASME, Ser. E, **26**-4 (1959), 613.
14) I. M. Daniel, Exp. Mech., **6**-5 (1966), 225.
15) D. E. Jones and A. T. Ellis, Trans. ASME, Ser. E, **30**-1 (1963), 51, 61.
16) 茶谷，金大工紀要，**6**-3（昭46），253.
17) R. C. J. Howland, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A. Vol. 229 (1930), 49, A. Vol. 232 (1933), 155.
18) 石田，機械学会論文集，**19**-83（昭28），5.

（昭和47年9月20日受理）