面内集中荷重を受ける円輪の動的挙動†

武 石 洋 征* 桜 井 好 正** 工 藤 健**

Dynamic Response of Circular Rings under Inplane Impact

by

Hiroyuku TAKEISHI*, Yoshimasa SAKURAI** and Takeshi KUDO**

Dynamic response of circular rings with various diameter ratios to inplane concentrated impact was examined. The electromagnetic induction method was employed for the generation of impulse because of its good reproducibility and controllability of amplitude. The dynamic photoelastic method and semiconductor strain gauges were used for the measurement of the stress wave propagation through the circular ring.

It was confirmed that compressive stress waves propagated into the circular ring transformed to tensile stress waves at the position of conflux stress waves. The stress concentration ratio in the circular ring under the present condition was 12-13% higher than that of the case subjected to diametrically opposite external concentrated static load. Moreover, when excessive stress waves were generated in the circular ring, the appearance of a group of cracks was observed.

Key words : Circular ring, Dynamic stress concentration, Dynamic response, Dynamic photoelasticity, Inplane impact, Mode transition, Phase transition

1 はじめに

円輪は構造部材や機械部品に比較的一般に用いられている。このような部材に衝撃力が加わったときの動的挙動を調べることは、円形部材一般に対する基礎的知見を得ることとなる。円輪の動的挙動の研究は数多く発表されているが、それらは分布衝撃荷重下における応力の最大値¹⁾、回転による破壊さらに集中衝撃荷重を受けるぜい性円輪の破壊などである。しかし面内集中荷重を受ける円輪の動的応力集中やその発生位置、また応力波の伝ば過程で生じるモード変換などに関する報告は見受けられない。

本研究では面内衝撃を円輪の外周部から与えたとき、応力波の伝ば過程で生じる種々の衝撃応答について述べる。円輪に入射された応力波は二手に別れ衝撃箇所と対向する位置で再度合流する。応力波の伝ば過程で波の重ね合わせによる応力値の高まり、応力集中発生位置の変移現象⁴⁾、伝ば中における位相の反転、モード変換等⁵⁾も当然予想される。このように静的結果から予想のつかない応力波のふるまいを見いだすことを目的とする。これらの問題を明らかにするためには、応力波が構造体を伝ばする過程を逐一観察する必要がある。そのためには、目的に合った応力波を構造物中へ入射することも必要だが空間分解能の点で優れているパルス状の応力波を用いることも有利であると考えられる。

衝撃の負荷方法は再現性が良く、応力振幅が容易に制御できる電磁誘導法による応力波発生装置を使用した。応力波の伝ば過程の観察には動的弾性法を用い、応力集中部での位相の反転およびモード変換が確認された。さらに、円輪中に発生する応力集中の位置や動的応力集中率を見いだす目的で、円輪の内径を変化させた系統的光弾性実験を行った。また過大な応力波による円輪の破壊現象も観察されている。

2 実験方法の概要および形状パラメータ

2・1 実験方法の概要

Fig. 1 は実験に使用した電磁誘導法による応力波発生装置の原理図と衝撃源に設置された円輪の形状および寸法を示したものである。コンデンサに充電した電荷をトリガー放電によって放電ギャップ Sw_1 を通してへん平コイルに流す。このときコイルと非磁性体金

Fig. 1. Schematic diagram of stress wave generator and ring.

† 原稿受理 昭和63年11月30日 Received Nov. 30, 1988

* 正会員 千葉工業大学 習志野市津田沼, Chiba Institute of Technology, Tsudanuma, Narashino

** 千葉工業大学 習志野市津田沼, Chiba Institute of Technology, Tsudanuma, Narashino

属板との間には電磁誘導により反発力が働き金属板は急激な運動を開始する。この金属板は厚さ 6 mm の光弾性用樹脂製の円輪の外周部と一線で接しているので、円輪中へは圧縮の応力波が発生する。任意の回路定数で放電すると放電電流は減衰振動を行う。ここでは、ダイバートギャップスイッチ SW_2 により、第一番目の放電電流のエネルギーのみを衝撃力に使い後に続く振動電流をアースに放出する。これにより、単一の応力パルスを発生させている。

円輪中を伝ばする応力波を検出する方法としては動的な光弾性法を用いた。動的な光弾性装置の光学系は、Cranz-Shardin の方法を用いており、光源にはキセノンフラッシュランプを用い、その各々の発光時間は $1 \mu\text{sec}$ である。⁶⁾

円輪の形状パラメータである内径と外径および断面積の変化は応力集中部の応力値に大きな影響を与える。問題の複雑さを避けるため、ここでは内径のみを変化させた。円輪の板厚 $t=6 \text{ mm}$ 、外半径を $r_2=45 \text{ mm}$ 一定、内半径を r_1 とし、内外径比を $r_2/r_1=1.5, 1.8, 2.0, 2.25, 2.5, 3.0, 4.5, 9.0$ の 8 種類について衝撃実験を行った。なお、円輪には応力波の伝ばと最大応力の発生位置の確認をするため、 $\theta=0^\circ$ から 360° まで 10° ごとに罫描線が入れている。

3 動的応力のモード変換および位相の反転

3・1 動的応力のモードの変換

光弾性実験の結果、形状パラメータの変化にかかわらず応力波が円輪を伝ばする過程で、 $\theta=0^\circ$ と $\theta=90^\circ$ (対向側の $\theta=270^\circ$) 近傍と応力波の合流位置 $\theta=180^\circ$ のいずれも内径上に応力の集中する箇所が観察された。そのときの得られた代表的なしま写真を Fig. 2 に示す。これらは $r_2/r_1=1.8$ 、(a) 衝撃後 $80 \mu\text{sec}$ 、(b) 衝撃後

$150 \mu\text{sec}$ である。円輪に応力波が発生した後、二手に別れて伝ばし、 $\theta=90^\circ$ 近傍の内径側で発生する応力の記号を σ_s 、 $\theta=180^\circ$ の内径側で発生する応力の記号を σ_t とし、その各々の最大値を $\sigma_{s\max}$ 、 $\sigma_{t\max}$ とする。Fig. 2 では、 $\sigma_{s\max}$ は $\theta=65^\circ$ ($\theta=295^\circ$)、 $\sigma_{t\max}$ は $\theta=180^\circ$ に発生していることがわかる。また $\theta=0^\circ$ の応力分布は衝撃箇所を含んでいるため衝撃時の接触条件によって変化する。今回行われた実験では、 σ_s と σ_t の応力値の変化に注目することにした。今後は、 σ_s および σ_t は光弾性実験から得られるしま次数に置き換えて、各々を N_s および N_t と表示する。

材料の強さを考える場合には、応力集中の発生位置での動的応力のモードを知る必要がある。光弾性樹脂中に発生する動的応力の縦モードと横モードは、平面偏光の場合において分離することができる、Fig. 2 に示したものと同一の形状の円輪に対して $N_{s\max}$ および $N_{t\max}$ のモードを調べた。Fig. 3 (a), (b) は $1/4$ 波長板を外して偏光子の最大感度を各々 $\theta=65^\circ$ 、 $\theta=180^\circ$ に設定して得られた平面偏光の場合での縦波と横波の分離撮影されたしま写真である。ただし、光弾性モデルは衝撃箇所より破損しやすいので、この実験では Fig. 2 で行った衝撃エネルギーより若干低い値で応力波を入射している。図 (a) は縦波を (b) は横波を検出できるよう偏光子の角度は 45° の相違がある。例えば、縦モードを検出した Fig. 3 (a) では、 $\theta=65^\circ$ に沿って光弾性しまは内径から外径にいたるまで、すべてのしま模様が記録されている、もし、この応力分布中に横モードが混入しているのならば、そのしまは記録されないはずである。同様なことが、 $\theta=180^\circ$ に沿う横モードの検出 (b) においても説明できる。すなわち、(a), (b) のしま写真より明らかに $\theta=65^\circ$ 、 $\theta=180^\circ$ に沿うしまの分

(a) (b): The ones obtained by polarizer set in the direction of maximum sensitivity for longitudinal wave and transverse wave, respectively.

Fig. 2. The photoelastic fringe patterns obtained for stress concentration in the process of stress wave propagation in the ring of diameter ratio $r_2/r_1=1.8$.

Fig. 3. Photoelastic fringe patterns after the propagation of
(a) 80 μsec and (b) 150 μsec from an incident. $r_2/r_1=1.8$.

布は, (a)は縦モードを, (b)は横モードのしさを表していることがわかる. 行った実験の範囲では, $\theta_{s\max}$ が発生する角度 θ に沿う応力分布は常に縦モードが分布していた. しかし, r_2/r_1 が非常に大きくなるにつれ $\theta=180^\circ$ に沿う応力分布には, 縦波が混合される割合が大きくなると予想される. ただし, 行われた実験の範囲では $\theta=180^\circ$ の内径側では常に横モードによって最大応力 $N_{\max}$ は支配されていることがわかった.

3・2 応力波の位相の反転

動的光弾性法により応力波の位相を判別するには, 等傾線の精度の低さなどが原因して, 事実上不可能といえる. そこでゲージ長さ 2 mm の半導体ゲージによって応力集中箇所の位相の確認を行った. ひずみゲージは衝撃源から発生する電磁波のノイズによって大きな誤動作を受ける. ここでは簡単な空気銃を製作し, プラスチック製の弾丸を円輪へ衝突させ, 面内衝撃を与えた. 円輪には, 電磁誘導法による金属平板の急激な移動により応力波を発生させているので, ここでも

同じような接触状態を近似させるために, 弾丸の直径は 12 mm, 長さ 10 mm, 先端は平面に仕上げ, 円輪の厚み方向に対して一線で衝突するようにした. Fig. 2 の光弾性しま写真より得られた応力集中の生じている内径側 2 箇所, $\theta=65^\circ$, $\theta=180^\circ$ の位置の半径方向に垂直な軸に各々ひずみゲージを貼って応力波の位相を調べた. Fig. 4 がそのとき得られたひずみゲージからの出力波形である. 同図より明らかに $\theta=180^\circ$ に発生しているひずみの方向は反転していることがわかる. また, $\theta=65^\circ$, $\theta=180^\circ$ に発生する応力集中の持続時間は半値幅とともに 40 数 μsec を得ている. 同一の位置における応力の高まりを光弾性しま写真より調べた結果はほぼ同一の持続時間を得ていることがわかった (Fig. 6, Fig. 7). したがって, ひずみゲージによって検出されたひずみは応力に対応して表れているといえる. さらに $\theta=65^\circ$ の内径上に発生する最大応力は圧縮応力であり, $\theta=180^\circ$ では引張応力に反転する. 行われたすべての形状では $\sigma_{s\max}$ は圧縮応力, $\sigma_{i\max}$ は引張応力によって支配されていることがわかった.

4 円輪の動的応力集中

4・1 円輪の動的応力集中度

衝撃実験の際, 形状パラメータの変化に応じて, 円

Fig. 4. The strain waves obtained by the strain gauge at positions of $\theta=65^\circ$ and 180° .

Fig. 5. The maximum fringes as a function of the charged-up energy.

輪中に発生する応力波の振幅, 持続幅をコントロールしなければならない。まず動的応力集中部位に対する振幅の依存性を調べるため, 充電エネルギーを 350 J, 470 J, 590 J と段階的に変化させ, 衝撃力に対する N_{smax} , N_{imax} の振幅依存性を調べた。Fig. 5 は 3 種類の充電エネルギーに対する N_{smax} と N_{imax} の関係を示したものである。同図よりほぼ正比例の関係になっていることがわかり, 少なくとも 590 J までの充電エネルギーに対しては, 衝撃力に対する N_{smax} , N_{imax} の振幅依存性は考慮しなくてもよいことがわかった。

応力波の持続幅の相違によっても動的応力集中率は大きく異なってくる。⁷⁾ 入射波形を論じる場合, 衝撃部近傍の応力波を観察しなければならないが, 今回の実験のように内径が系統的に変わる場合, 反射や拡散による応力波は円輪の自由境界と干渉して複雑な応力分布になる。ここでは, 応力波によって引き起こされる N_{smax} の持続時間を一定に保つこととした。電磁誘導法により入射される応力波形はコンデンサ容量が一定であると充電電圧に応じて波形の振幅は変わるが, パルス幅はほぼ一定値をとり, かつピークは高原のないパルス状波形になることがわかっている。⁶⁾ そこで今回の実験ではコンデンサ容量を一定にして充電電圧のみを変化し, 入射応力波の持続時間は常に一定とした。

Fig. 6. Duration time of stress concentration at point of N_{smax} .

Fig. 7. A variation of photoelastic fringes and its incident angle of stress concentration.

Fig. 8. The position of stress concentration as a function of diameter ratio.

Fig. 6 に行われた代表的な内外径比の形状に対して N_{smax} の位置における応力の高まりを時間との関係で示す。この図より, 動的応力集中の持続時間は半値幅で 42~45 μsec の範囲であり, これを N_s における応力集中の持続時間とした。

Fig. 7 は $r_2/r_1=1.8$ の形状に対する, N_s と $\theta=180^\circ$ に発生する N_i のしま次数の変化と, ならびに N_s の発生位置と衝撃後の時間との関係を示したものである。図中の N_s は, 衝撃後 80 μsec で最大値 N_{smax} となる。その時, 発生する N_{smax} の角度は $\theta=65^\circ$ である。その後, N_s は減少するが二手に別れていた応力波は $\theta=180^\circ$ の地点で合流し, 衝撃後約 150 μsec で最大しま次数 N_{imax} を示すことがわかる。なお, 前節で述べたひずみ波形と光弾性しまとの持続時間の比較は同図中 N_i の曲線から得られた。Fig. 8 は, 円輪の形状パラメータの変化に応じて変化する N_{smax} の発生角度を表したものである。円輪のように形状全面にわたって応力のかく乱があるとき, 動的応力集中率を求める際の基準応力は応力集中部断面に分布する平均応力をとるべきである。しかし動的な光弾性実験からその断面の主応力分離を行うのは非常に困難をとまなう。ここでは, 入射応力波の持続時間の代わりに N_{smax} に生じる動的応力集中の持続時間を一定としているので, N_{smax} を基準応力としてもさしつかえない。しかし, 一般的な応力集中率の定義との混乱を避けるため, ここでは N_{smax} に対する N_{imax} の比を動的応力

Fig. 9. Dynamic and static stress ratio as a function of diameter ratio.

Fig. 10. The photoelastic fringe patterns after the propagation of (a) 135 μ sec (b) 180 μ sec. $E=1130$ J.

比率 R_D と定義し, 求める R_D を

$$R_D = N_{i\max} / N_{s\max} \quad (1)$$

と表すこととする.

Fig. 9 は式(1)により得られた動的応力比率と形状パラメータの関係を示したものである. 図中の静的応力比率 R_s は, 極座標における2次元問題としての対向圧縮力を受ける円輪の応力値⁹⁾から求められたものである. 静的な場合には, 応力集中の発生角度は $\theta=90^\circ$, 270° と $\theta=0^\circ$, 180° であり, そのときの応力値を, 式(1)を静的な場合に置き換えて R_s を求めたものである. 両者の応力比率を比較すると, 全範囲に渡って R_D は R_s より約 12~13 % の高まりを示している. また, 形状パラメータの違いによって, 円輪中に生じる最大応力は $R_D/R_s=1.0$ を境にして $N_{i\max}$ と $N_{s\max}$ は逆転するが, 静的な場合には $r_2/r_1>2.5$ までは, $\theta=180^\circ$ に発生する応力が高い値を示している. 動的な場合には, $r_2/r_1>4.0$ まで, それは延長しているのがわかった.

4・2 円輪の破壊について

円輪に過大な衝撃力を与えると Fig. 5 に示された直線性は失われ, 光弾性樹脂の弾性が失われ破壊する. Fig. 10 は, $r_2/r_1=1.8$, 充電エネルギー 1130 J のとき $\theta=180^\circ$ から破壊する前後の円輪を光弾性しと共に示したものである. 同図より, 衝撃後 135 μ sec のしま写真より $\theta=180^\circ$ の線に沿って観察すると, 中立点を挟んで内径側に引張応力, 外径側に圧縮応力が分布する典型的な曲げモーメントが加わっているのがわかる. 衝撃後 150 μ sec では, 既にき裂は発生している. その後き裂は外径側の圧縮応力に進行を妨げられ, 引張応力側に枝分かれして放射状に伝ばすると考えられる. さらに同一形状の円輪に対して前回の衝撃力より大きい, 1260 J および 1400 J の2種類の充電エネルギーで衝撃実験を行った. 両者のき裂状態を Fig. 11 に示す. そのときのき裂は放射状に進展していくのは同じであったが, 破壊に寄与する応力値は $\theta=180^\circ$ 近傍の内径側に広く分布するため, それぞれき裂の本数が

Fig. 11. The photoelastic stress fringe patterns during dynamic crack propagation for stress wave at $\theta=180^\circ$. (a) 1260 J (b) 1400 J.

多くなり群き裂として進行する傾向が見られる。このように複雑な応力下における破壊現象については、破壊力学的な見地からもさらに追求する必要がある。

5 結 言

内径と外径の比が系統的に変化する円輪に電磁誘導法により、面内衝撃を与える衝撃応答実験を行った。応力波の測定には動的光弾性法と半導体ひずみゲージを併用した。入射された応力波は円輪中で応力の位相の反転が行われることがわかった。

平面偏光の場合において横モードと縦モードの分離を行い観察した結果、 $\theta=180^\circ$ の位置に生じる応力波は横波によって生じていることがわかった。

動的応力集中の発生位置と動的応力比率が形状パラメータとの関係で求められた。行われた実験の範囲では、動的応力比率の値は、対向圧縮力を受ける円輪の静的応力比率の値より12~13%の高まりを示していた。

円輪中を過大な応力波が伝ばするとき進行する群き

裂の様子も観察された。この破壊現象についてはさらに破壊力学的見地からも研究を進めていく必要があると思われる。

参 考 文 献

- 1) 鈴木真一, 日本機械学会論文集, **44**, 32 (1978).
- 2) 佐藤和郎, 永井文雄, 日本機械学会誌, **69**, 1617 (1966).
- 3) S. Kida and J. Oda, Exp. Mech., **23**, 425 (1983).
- 4) 河田幸三, 橋本彰三, 日本光弾性学会講演論文集, **6**, 101 (1984).
- 5) 武石洋征, 安本義正, 材料, **34**, 113 (1985).
- 6) H. Takeishi and Y. Yasumoto, Acustica, **53**, 95 (1983).
- 7) R. Sheas, Exp. Mech., **4**, 20 (1964).
- 8) 松本浩之, 非破壊検査, **18**, 343 (1969).
- 9) E. A. Ripperger, N. Davids, Trans. ASCE, **112**, 619 (1947).
- 10) 西田正孝, 武石洋征, 光弾性学論文集, **3**, 1 (1981).