回転翼形ディスクの不釣り合い荷重による応力拡大係数の解析*

中 村 保 雄^{*1}, 高 橋 賞^{*1}Experimental Analysis of Stress Intensity Factor on the Disk
with Unbalanced Load under Rotation

Yasuo NAKAMURA and Susumu TAKAHASHI

It causes sometimes rotary machineries to vibrate when there are unbalanced forces into them. In that case, we usually make them balanced forces. So we have investigated as to the stress intensity factor K_I on the rotating disk having cracks under the unbalanced force by means of both the photoelastic freezing method and the caustics method. In conclusion, it seems that the values of the stress intensity factor K_I at both the point of nearer and the opposite site to the unbalanced force are higher than those of not near it. Therefore, if there are the unbalanced forces on the rotating body, that is more possible to destroy it.

Key Words: Stress Intensity Factor, Rotating Disk, Unbalanced Force, Photoelastic and Caustics Methods

1. 結 言

近年, 機械の形状や速度が大きくなっていくに伴い, 振動問題の解析が機械工学上の設計に対して, 重要性を加えてきている。

回転体の軸がその物体の慣性主軸に一致している場合には, 不釣り合い力をその軸受に及ぼすことは少ない。しかし, その製作過程では形状寸法の誤差, 材料の不均一性や不規則な質量分布などが存在し, 均一なバランスを得ることが困難なこともある。したがって, 不釣り合い力がある場合には, それを釣り合わせて, 機械の振動を生じさせないようにしなければならない。特に, 高速回転の場合には, 小さな不釣り合いであっても, 非常に大きな不釣り合い力となるので重要である。さらに, タービンブレードなどが回転中になんらかの原因による欠損を起こせば, それに起因した不釣り合い力によって事故につながる恐れがある^{(1)~(3)}。

一方, 不釣り合い力を利用した用途もあり, そのような場合の応力の状態を把握することも必要なことである。すなわち, 最近, その需要が大きい携帯電話でべ

ル音ではなく, 振動で着信を知らせるのに用いられている振動モータは重心の偏った重りを高速回転させて振動を起こしている。

以上のような状況にかんがみ, 本研究では, 円板の外周に切り込んだ溝を翼に見立てた翼形ディスクの溝底部にスリット, すなわち, き裂を有する回転翼形ディスクの不釣り合い荷重による応力拡大係数の解析を光弾性応力凍結法およびコースティックス法により行った。

2. 試験片および実験方法

供試体は, 12 枚の翼形の根もと部にスリットを有する円板をポリカーボネイト板より, 図 1 に示すごとく, 機械加工した。

不釣り合い荷重は, 円板(質量 138 g)の点 $P(m, n)$ (m は図 1 に示す位置, n は各重りの表示)に, その質量の 0%, 3% (4.6 g), 5% (6.6 g) および 7% (9.7 g) の重りをその両側にねじ止めした。すなわち,

- 2.1 不釣り合い荷重がない場合
- 2.2 P 2 点に, 3, 5 および 7% の不釣り合い荷重が存在する場合
- 2.3 P 1, 2, 3 点に, 5% の不釣り合い荷重が存在する場合

* 原稿受付 1997 年 6 月 11 日。

*¹ 正員, 関東学院大学工学部(☎ 236-8501 横浜市金沢区六浦町 4834)。

である。

応力凍結は、定常回転数 1500 rpm で、樹脂であるポリカーボネイトの凍結サイクル、すなわち、炉内温度 155°C で 1 時間負荷した後、3°C/h で室温まで徐冷した。なお、回転方向は時計回りである。

3. 応力拡大係数の算定

3・1 光弾性法 開口形モード状態における応力拡大係数 K_I と光弾性しま次数との関係は、き裂先端の座標系を図 2 のようにとると、Irwin が示している次式

$$K_I = \frac{n\sqrt{2\pi r_m}}{\alpha t \sin \theta_m} \left(1 + \left(\frac{2}{3 \tan \theta_m} \right)^2 \right)^{-0.5} \times \left(1 + \frac{2 \tan (3\theta_m/2)}{3 \tan \theta_m} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 n ：しま次数、 α ：光弾性感度、 t ：試験片厚

さ、 r_m ：き裂先端から n_m 次の等色線までの距離、 θ_m ： r_m に対し光弾性しまが最も張り出す角度と表すことができる⁽⁴⁾。

3・2 コースティックス法 開口形モード状態におけるコースティック像は図 3 のようになり、 K_I は

$$K_I = \left(\frac{1.671}{Z_0 t |C_0|} \right) \times \left(\frac{1}{\lambda^{3/2}} \right) \times \left(\frac{D_{\min}}{\delta} \right)^{5/2} \dots\dots\dots (2)$$

で求められる⁽⁵⁾。

ここに、 Z_0 ：試験片とスクリーンの距離、 t ：試験片厚さ、 λ ：倍率 $= (Z_0 + Z_i)/Z_i$ 、 Z_i は点光源と試験片との距離、 $D_{\min}$ ：スクリーン上におけるコースティック像の最小径、 C_0 ：光学定数、 δ ：材料定数。

応力凍結後、光弾性写真を拡大して、それぞれの値を実測し、式(1)、(2)より応力拡大係数 K_I を算出した。

4. 実験結果および考察

図 4(a) に示す不釣り合い荷重のない、いわゆる、正常な回転円板の等色線しま模様がほぼ均一な状態を示しているのに対し、図 5(a) のごとく、不釣り合い荷重が

Fig. 1 Specimen geometry

Fig. 2 Notation and sketch of isochromatics at the crack tip

Fig. 3 Caustic image

(a) Isochromatic fringe pattern

(b) Caustic pattern

Fig. 4 Whole field pattern in the case of none unbalanced load

存在する場合、そのしま模様は不均一な状態で、前者のしま模様とは異なっている。さらに、き裂先端のしまパターンは左右対称ではなく、不釣り合い荷重に近い側のしまのほうがより張り出していることがわかる。図5(b)は、不釣り合い荷重が存在する場合のコースティック像を示す。その像は、各き裂のとも、ほぼ真円を成しており、き裂先端部に主として開口形変形の応力拡大係数 K_I が存在していることがわかる。図6に、

光弾性しま模様およびコースティック像の部分図拡大を示す。これらの光弾性しま模様からも、No.11 および No.12 のき裂においては、不釣り合い荷重に最も近い No.1 き裂側のしまパターンであるき裂の中心に対する左側がより張り出している。しかし、No.2 および No.3 のき裂においては、反対側になる右側がより張り出していることが明りょうにわかる。

実験結果より得られた応力拡大係数と各き裂との関

(a) Isochromatic fringe pattern

(b) Caustic pattern

Fig. 5 Whole field pattern in the case of having unbalanced load

No. 11 No. 12 crack No. 1 No. 12 No. 1 crack No. 2 No. 1 No. 2 crack No. 3

Photographs of isochromatic fringe pattern

Photograph of caustic pattern on No. 12, No. 1 and No. 2 crack

(a) Photographs of isochromatic fringe pattern and caustic pattern

Photograph of isochromatic fringe pattern on No. 7 crack

Photograph of caustic pattern on No. 7 crack

(b) Photographs of isochromatic fringe pattern and caustic pattern

Fig. 6 Photographs of crack parts

係を以下に示す。

図7は、不釣り合い荷重が存在する場合の各き裂におけるその先端の左右しまパターンによる応力拡大係数を図示したものである。平衡状態における回転の場合、応力拡大係数の算出は回転方向、すなわち、き裂先端左側のしまパターンから算出した。しかし、不釣り合い荷重の位置と各き裂との位置関係により、左側または右側のしまパターンに準拠し、その K_I 値の大き

いほうを採用した。

荷重の変化(位置一定)による応力拡大係数とき裂の位置の関係を図8(a)および(b)に示す。図8より、不釣り合い荷重が存在する半径上のき裂 No. 1 の両側、すなわち、き裂 No. 12 および No. 2 の K_I 値が急激に減少している。これは、き裂 No. 1 がモード I の変形、すなわち、き裂が開くため、その両側のき裂に力が作用したためと推測できる。このことは、光弾性しま模様全体図における各き裂の開きの度合いからも見てとれる。さらに、き裂 No. 1 の対極、き裂 No. 7 には、不釣り合い荷重による抗力が働き、 K_I の値が大きくなっているものと思われる。

図8(a)と(b)における値に相違が生じているのは、 K_I 値を算出するに当たり必要となる測定値がコースティックス法では、その像の計測が比較的容易である。しかし、光弾性法におけるしまの計測は、き裂先端では外挿値によるもので、そのため、厳密性に欠けるものと思われる。

荷重の位置の変化(荷重一定)による応力拡大係数とき裂の位置の関係を図9(a)および(b)に示す。 K_I 値の変化は不釣り合い荷重が存在する半径上のき裂 No. 1 の両側、き裂 No. 12 および No. 2 の K_I 値が急激に減少し、その対極のき裂 No. 7 の K_I 値が大きくなっていることは、先に述べたとおりである。不釣り合い荷重の位置の変化は、すなわち、遠心力の変化により、

Fig. 7 K_I based on both left and right fringe pattern of crack tip

(a) Based on photoelastic fringe pattern

(b) Based on caustic pattern

Fig. 8 Relation between stress intensity factor and each crack in the case of various unbalanced loads

Fig. 9 Relation between stress intensity factor and each crack in the case of various places of unbalanced load

外周に近い位置ほど、その K_I は大きな値を示している。

以上のことより、存在する不釣り合い荷重が大きいほど、さらに、その存在する位置が外周に近いほど、応力拡大係数 K_I の値は大きいことがわかる。さらに、不釣り合い荷重が存在する対極の位置におけるき裂の応力拡大係数にも大きな影響を及ぼすことがわかる。

光弾性法による結果がコースティックス法よりも多少低い値を示しているものの傾向が一致している。

5. 結 論

回転体に関して、不釣り合いな力がある場合には、それらを釣り合わせる方法をとることが一般的であり、不釣り合いな回転体のき裂解析の報告はほとんど見受けられない。

本研究は、き裂を有する回転体の不釣り合い荷重による応力拡大係数を光弾性法ならびにコースティックス法により求めた。

その結果、次のような知見が得られた。

(1) 応力拡大係数算出の基となるき裂先端の左右の光弾性しまは、正常な場合、回転方向のしまが基となるが、不釣り合い荷重が存在する場合は、その荷重側のしまが基となることがある。

(2) 不釣り合い荷重が存在する位置に最も近いき裂の K_I の影響を受け、その両側のき裂の K_I は小さくなる。さらに、その荷重の対極のき裂の K_I にも大きな影響を及ぼす。

(3) 不釣り合い荷重が存在する位置により、 K_I は影響を受ける。

(4) 同位置における不釣り合い荷重の大小により、 K_I は影響を受ける。

(5) コースティックス法は、その像の計測が容易で、応力拡大係数を算定できる。光弾性法は、しまの計測は難しいが、各き裂間の影響する状況を確認することができる。

文 献

- (1) 中村保雄・高橋賞, 回転遠心力によるダブルテール形継手の応力解析, 機論, 51-466, A(1985), 1613-1620.
- (2) 中村保雄・高橋賞, 圧縮機動翼の羽根根もと部のき裂解析, 機論, 53-496, A(1987), 2394-2399.
- (3) 中村保雄・高橋賞, 真空状態における回転遠心力による圧縮機動翼羽根根もと部のき裂解析, 機論, 55-514, A(1989), 1305-1310.
- (4) 高橋賞・野方文雄, 光弾性法の機械工学への適用とその応用(1), 機械の研究, 38-1(1986), 82-86.
- (5) 高橋賞・清水紘治, コースティックス法の理論と適応例(1), 機械の研究, 37-4(1985), 485-490.