620.171.5:539.382.07

増厚補強円環を有する板の引張りに関する光弾性実験*

(続 報)

清家政一郎**, 石井正満***, 栗栖善男****

Photoelastic Investigation of the Maximum Stress in a Plate
with a Reinforced Circular Hole under Tension
(Continued Report)

by Masaichirō SEIKA, Masamitsu ISHII, and Yoshio KURUSU

The stress-freezing and slicing technique is applied to obtain the maximum stress in a plate having a reinforced circular hole and subjected to uniaxial tension. Specimens are so constructed that a ring of epoxy resin is cemented to the inside of the hole cut in a plate of the same material. The difference method is used to find the variation of fringe intensity in the ring. The effect of the dimensions of the ring and the widths of the plate on the maximum stress is investigated. The optimum strength condition for the circular hole with a stiffening ring is discussed. The present results are of practical interest in connection with the reinforcement of the plate having a circular hole.

1. 緒 言

前報⁽¹⁾⁽²⁾においては、増厚補強円環を有する十分広い板、および板幅が狭く補強環の外径に等しい板に単軸引張りが作用する場合を取扱い、補強環内の応力集中を凍結法三次元光弾性によって解析した。増厚によって円孔縁の応力集中がどのように軽減されるか、二次元的に取扱った従来の研究結果⁽³⁾と比較して最大応力がいかに大きくなるか、また補強環の寸法をどのように選べば最も有効であるか等について明らかにした。

本報告では、板幅が増厚補強円環の外径の 1.5 倍および 2 倍の場合を探り上げ、板の引張りによる環内の応力集中を前報と類似の方法によって三次元的に解析した。これは、補強穴と板の境界との相互干渉が環内の応力集中に及ぼす諸影響を検討するため、板幅の大きさが前報の中間の場合を取扱ったものである。試験片は、エポキシ樹脂板内の円孔に同一材料の円環をそう入し、接着して作製した。円環の高さおよび肉厚を種々変えて環内の最大応力を求め、各部の寸法が穴縁の応力集中の軽減にいかなる影響を及ぼすかを明らかにした。さらに、前報および本報の結果から、各板幅

に対する補強環の有効高さを明確にし、有効な肉厚を与える設計資料を提供した。

2. 実 験 方 法

焼なましによって初応力を除いた素材を用い、第 1 図に示すような試験片を作製した。板と円環との接着には、前報と同様にイーストマン 910 を使用した。板の長さは、荷重端が補強部に影響を及ぼさないように十分大きくとった。試験片寸法の詳細を第 1 表に示す。

二次転移域以上では、エポキシ樹脂の縦弾性係数が著しく減少して試験片が変形しやすくなるので、荷重

第 1 図 試 験 片

* 昭和 39 年 4 月 1 日 第 41 期通常総会講演会において講演、
原稿受付 昭和 39 年 5 月 30 日。

** 正員、名古屋大学工学部 (名古屋市千種区不老町)。

*** 准員、住友金属工業会社。

**** 名古屋大学工学部。

を加えた場合に荷重の二次的な要素による影響が著しい。したがって、引張荷重が試験片の中心線の方に正しく作用するように十分注意した。応力凍結炉には、前報と同じく、サーミスタ微小温度制御装置付の熱風循環式恒温そうを使用したが、炉内の温度は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内の精度ではば一様な分布を得ることができた。

応力凍結サイクルとしては、まず約1時間で常温から転移域以上の温度 125°C に上げ、そのまま約1時間保持した。この過程において、接着縁の近傍に多少の残留応力が認められることを除いて、環内に初期応力が全く存在しなくなることは前報ですでに述べたとおりである。荷重を加え、平衡させるため約1時間同一温度に保ってから温度を降下したが、転移域を通過する際には降下速度が1時間に 2.5°C となるように制御した。常温にて荷重を除き、試験片をスライスした。円環内の最大応力は第2図のA点に生ずるが、スライス方法は逐次削り落し法⁽⁴⁾を採用した。すなわち、円環の両端面を板の面と平行に等量ずつ削り取って順次高さを減らし、それぞれの高さに対するA点の

しま次数を逐次測定した。A点における端数のしま次数は、水銀燈光源を直接使用し、検光子を回転して最高次のしまの中央付近にある敏感色帯をA点に一致させ、その回転角から求めた⁽⁵⁾。

しま次数 n と自由境界における主応力 σ kg/mm^2 との関係は、一般に次式で与えられる。

$$n = \alpha \sigma S \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 α は凍結温度での光弾性感度 mm/kg , S はスライス厚さ mm である。本実験では、円環の高さ h でのしま次数 n_1 , 中間の高さ h' まで削り落した場合のしま次数 n_2 , および板厚 t まで削り落した場合のしま次数 n_3 を逐次測定したが、これらはいずれも左右のA点における測定値の平均を取った。それぞれの高さに対する平均応力は、(1)式から次式のように表わされる。

$$\sigma_1 = \frac{n_1}{\alpha h}, \quad \sigma_2 = \frac{n_2}{\alpha h'}, \quad \sigma_3 = \frac{n_3}{\alpha t} \dots\dots\dots (2)$$

一方、引張荷重 P による板内の公称応力 σ_0 は

$$\sigma_0 = \frac{P}{bt} \dots\dots\dots (3)$$

であるから、各平均応力による応力集中率は

$$K_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}, \quad K_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_0}, \quad K_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_0} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。

なお、すでに述べたように、二次転移域以上の温度では試験片の縦弾性係数が著しく減少するので、試験片の変形およびクリープによる誤差を避けるため、 n_3 が3内外になるように荷重 P を定めた。この場合に、円環の内径の変化は1%以下であり、実験結果にはほとんど影響しない。

光弾性感度 α は、各試験片と同じ素材から円板の較正試験片を採り出し、同一の凍結サイクルのもとで直径方向の集中圧縮荷重を加え、中心のしま次数を測定

して求めた。この際、端数のしま次数は前述と全く同様な操作を行なって求めた。

3. 実験結果および考察

第3図は、応力集中率と円環の高さとの関係を示したものである。 $h/t=1$ における $\odot$, $\ominus$, $\triangle$ および $\blacksquare$ 印は、Howlandの理論値⁽⁶⁾をもとにして導び

第2図

第1表 試験片の寸法

$D=30 \text{ mm}$

b/D	d/D	No.	$h \text{ mm}$	$h' \text{ mm}^*$	$t \text{ mm}$	$b \text{ mm}$	h/t	h'/t
1.5	0.7	1	5.97		5.97	45.10	1.00	
		2	8.89		5.93	45.00	1.50	
		3	8.89		5.95	45.05	1.49	
		4	11.73	8.88	5.96	45.15	1.97	1.49
		5	11.74	8.85	5.98	45.15	1.96	1.48
		6	17.67	11.92	6.06	45.35	2.92	1.97
		7	17.68	11.84	5.94	45.35	2.98	1.99
		8	23.68	14.98	6.04	45.20	3.92	2.48
		9	23.65	14.92	6.04	45.25	3.92	2.47
		10	29.65	17.83	5.94	45.00	4.99	3.00
		11	29.65	17.81	6.01	45.35	4.93	2.96
2.0	0.7	1	5.97		5.97	60.10	1.00	
		2	8.96		6.05	60.00	1.48	
		3	8.88		5.96	60.25	1.49	
		4	11.81	8.93	5.99	60.15	1.97	1.49
		5	11.79	8.88	5.96	60.25	1.98	1.49
		6	17.75	11.92	6.02	60.05	2.95	1.98
		7	17.75	11.75	5.91	60.25	3.00	1.99
		8	23.67	14.80	5.97	60.25	3.96	2.48
		9	23.68	14.80	5.98	60.20	3.95	2.47
		10	29.48	17.67	5.96	60.05	4.95	2.96
		11	29.48	17.64	5.99	60.15	4.92	2.94
	0.5	1	5.97		5.97	59.85	1.00	
		2	8.88		5.92	60.15	1.50	
		3	8.91		6.02	60.05	1.48	
		4	11.82	8.87	5.97	59.70	1.98	1.49
		5	11.71	8.84	5.97	60.20	1.98	1.48
		6	17.80	11.83	6.02	60.00	2.96	1.97
		7	17.78	11.80	6.02	60.10	2.95	1.96
		8	23.46	14.72	5.95	60.10	3.94	2.47
		9	23.62	14.68	5.96	60.15	3.96	2.46
		10	29.32	17.56	6.00	60.00	4.89	2.93
		11	29.36	17.68	5.99	60.05	4.90	2.95
	0.3	1	5.93		5.93	59.55	1.00	
		2	8.96		6.03	59.80	1.49	
		3	8.87		6.01	60.05	1.48	
		4	11.82	8.92	6.10	60.10	1.94	1.46
		5	11.82	8.93	5.96	60.00	1.98	1.50
		6	17.74	11.39	5.97	59.80	2.97	1.91
		7	17.72	11.83	5.97	60.10	2.97	1.98
		8	23.56	14.31	5.98	60.00	3.94	2.41
		9	23.68	14.83	5.97	60.00	3.96	2.48
		10	29.32	17.73	6.16	60.05	4.76	2.88
		11	29.54	17.74	5.95	60.10	4.95	2.99

* h' は中間スライスの高さを表わす。

き出された Heywood の実験式⁽⁷⁾から求めた値である。図示のように、ここで求めた実験値はわずかに低い値を示しているが、十分満足すべき精度を持つものである。図中の破線は K_1 の実験値を結んだものであるが、これらは円環内の応力分布が高さの方向に一様であると考えた場合の値である。これに対して、板厚 t まで削り落した場合の応力集中率 K_3 を結べば、実線のようになる。図から明らかなように、円環の高さの増加とともに K_3 は K_1 よりも著しく大きくなる。しかも、本実験の範囲内では、 h/t が 2.5 以上になると K_3 はほとんど一定値をとることがわかる。このことは補強円環の高さを板厚の 2.5 倍以上にしても無意味であることを示すものである。

第 2 図の A において、板厚の中心面から円環の高さに沿って測った距離を x とし、 $\xi = x/t$ 、 $\eta = K(\xi)\xi$ とおけば、 $\xi = h/2t$ 、 $h'/2t$ および $1/2$ に対する $K(\xi)$ の

第3図 応力集中率 K 第4図 ξ - η 曲線

実験結果 K_1 、 K_2 および K_3 を用いて ξ - η 曲線を得ることができる。ここで、 $d\eta/d\xi = k$ とおけば、 ξ - η 曲線上の切線のこう配 k は、任意の位置 x における円周方向の垂直応力 σ と公称応力 σ_0 との比を表わすことになる。特に、原点における切線のこう配は、板厚の中心面における応力集中率を与える。第 4 図は、一例として $h/t=3$ 、 $b/D=2$ の場合の ξ - η 曲線を示したものである。これらの曲線を用いて、円環の各断面の A における σ の分布を k と ξ で示せば、第 5 図のようになる。このようにして求めた板厚の中心面における応力集中率は、 K_3 よりもいくぶん大きな値を示し、本実験の範囲内では h/t の値にはほとんど無関係に両者の差が 4~10% となることがわかった。

第 6~8 図には、 $b/D=2$ の場合について d/D の各値に対する暗視野の凍結等色線図をそれぞれ一例ずつ示した。なお、接着が円環内の応力分布に及ぼす影響を検討するため、一例として板と同一厚さ ($h/t=1$) で $d/D=0.7$ の円環を接着した板を引張った場合の凍結等色線図を、第 9 図 (a) に示した。同図 (b) は、比較のために、これと同一の円孔を有する板が同一凍結サイクルのもとで同じ大きさの荷重を受けた場合の凍結等色線図である。図示のように、接着層における光弾性しまの連続は良好であり、両者の光弾性しまは接着部の近傍を除けば良く一致する。したがって、接着が孔縁の応力分布に及ぼす影響は無視してさしつかえない。

4. 結 言

前報および本報の結果によれば、補強環の有効高さは、板幅が増すにしたがって減少することが明らかになった。すなわち、無限板、帯板および板幅が補強環の

第5図 円環の各断面の A における σ の分布

$h/t=2.95$
 $K_1=1.22$

$h'/t=1.98$
 $K_2=1.53$
 $b/D=2, d/D=0.3$

$K_3=1.61$

第6図 暗視野凍結等色線図

$h/t=1.98$
 $K_1=2.01$

$h'/t=1.49$
 $K_2=2.13$
 $b/D=2, d/D=0.5$

$K_3=2.15$

第7図 暗視野凍結等色線図

$h/t=1.97$
 $K_1=2.36$

$h'/t=1.49$
 $K_2=2.45$
 $b/D=2, d/D=0.7$

$K_3=2.49$

第8図 暗視野凍結等色線図

(a)
 $h/t=1, d/D=0.7$

(b)

第9図 暗視野凍結等色線図

第 10 図 応力集中度 K_3

外径と等しい板の各場合に対して、補強環の有効高さはそれぞれ板厚の約 2, 2.5 および 3 倍に取れば十分であるという結論に達した。したがって、上述の各板幅に共通な円環の有効高さとして $h/t=3$ を選び、応力集中度 K_3 と板幅および円環の肉厚との関係を求めれば、第 10 図のようになる。図示のように、いずれの肉厚の場合にも、 b/D が 3 以上では K_3 の差がわずかなとなり、無限板の値に接近して行くことがわかる。

第 11 図は、 K_3 と肉厚 d/D との関係を b/D の各値について示したものである。 $d/D=0.6$ の付近を境にして、肉厚がこれより厚い場合には板幅が広いほど、また薄い場合には狭いほど K_3 の値が大きくなる。かくして、補強環の有効高さがすでに明らかになったので、補強穴縁において許容される最大応力を与えれば第 10 図および第 11 図から最も有効な補強環の肉厚

第 11 図 応力集中度 K_3

を決定することができる。

最後に、本研究を進めるに当たり、終始懇切なご指導を賜った名古屋大学の久保 肇教授に厚く感謝申上げる。

文 献

- (1) 清家・ほか 2 名, 機械学会論文集, 29-200 (昭 38-4), 745.
- (2) 清家・ほか 3 名, 機械学会論文集, 30-212 (昭 39-4), 510.
- (3) C. Gurney, *Rep. Mem. Aeron. Res. Comm.*, No. 1834 (1938).
- (4) M. M. Frocht, *Photoelasticity*, 2 (1948), 410, John Wiley & Sons, New York.
- (5) 大橋, 機械学会誌, 63-502 (昭 35-11), 1434.
- (6) R. C. J. Howland, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., Ser. A*, 229 (1930), 49.
- (7) R. B. Heywood, *Designing by Photoelasticity*, (1952) 267, Chapman & Hall, London.

自動車用の可変ピッチファン

暑い天候のきわめて悪条件のとき、ファンが十分に機関の冷却を行なうと、ファンは不必要に動力を吸収する。この動力の浪費を減ずるために最も簡単な装置を、ロンドンの Serck Radiator Service 社が最近紹介した。

Serck ファンの場合、各 4 枚の羽根が種々のピッチになるように回転する。羽根の抗力がねじれて荷重がかかった状態にあるコイルばねに働き羽根抗力がこのばねの予荷重よりも十分大きくなれば、羽根のピッチは減少する。この装置は、機関の最大スピードの約

半分になるまで普通のファンの働きができるように作られている。この速度以上では、増大する羽根の抗力とばねのこわさに従って、ファンの羽根が動く、機関の過熱による最も危険な状態は、普通最大トルク速度 (機関の最大速度の約半分) での運転であるから、この各種のピッチのファンをとりつければ、最大 rpm における力の損失を、50~65 % 減少できる。

(New Scientist, 1964, Vol. 21, No. 377, p. 325)

(日本科学技術情報センター提供)