

UDC 539.4.013/.014:
620.171.5:
621.452.32.037-253.5

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-403

軸流圧縮機動翼取付部の強度

(ピン結合の光弾性試験)

松末勝利・米内山誠

1975年1月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

軸流圧縮機動翼取付部の強度^{*} (ピン結合の光弾性試験)

松末 勝利^{**} 米内山 誠^{***}

Strength of Axial Flow Compressor Blade Roots.
(Photoelastic Stress Analysis of the Pin Joint Lug.)

By Katsutoshi MATSUSUE and Makoto YONAIYAMA

The stress on the periphery of the hole in the statically loaded pin joint lug was obtained by the photoelastic method in order to discuss the strength of the pin joint lug having a clearance between the pin and the pin hole.

The stress concentration factors were determined by the experiments of several specimens with different length ratio A/B (the hole diameter to the breadth of the lug) or with various shapes of the lug, then further experiments were made of the quasi-three dimensional lugs each of them were composed of three layers of the two dimensional lug and two spacers sandwiched between the lugs and bonded all together by adhesive.

The experimental results are summarized as follows;

- (1) When the length ratio (A/B) was large enough (say 0.67), the stress concentration of the lug increased as the clearance increased, and rapidly approached to a constant value, whereas, for the small range of the length ratio (say, less than 0.29), the stress concentration was slightly affected by the clearance.
- (2) The stress concentration of the eye-bar type lug increased very rapidly as the clearance increased and approached to a much higher value compared with the approaching stress of the non-eye-bar type lug with a constant width.
- (3) Stresses of three lugs of the quasi-three dimensional model were obtained by the stress freezing method, and reasonable thickness ratios of the inner- to the outer-lugs were experimentally determined for the present three cases.

1. まえがき

軸流圧縮機あるいは軸流タービンの動翼結合部は、回転による動翼の遠心力を最も多く受ける部分であるから、その構造については、以前からかなり研究されている。またその結合方式にもいろいろあつて、Dove-Tail型、T型あるいはピン結合型などがある。それぞれの型について強度向上、重量軽減、振動減衰特性などの問題に関して、その得失が検討されたのち、実機に採用されている。当所で試作研究されたJR-200系エンジンにおいては、振動問題に効果的に対処するためにピン結合が採用されている。ピン結合の研究に

1)～5)
については、今までにいくつか発表されているが、これらの論文は、ピンとピン穴とのすきま、ピン穴とラグ巾との寸法比、ラグの形状などのいずれか一定の場合の研究であつて、ピン結合の強度を論ずるには、必ずしも十分なデータが得られていない。そこで本報では、これらすきま、寸法比、ラグ形状、荷重などを系統的に変えて、広範囲な光弾性実験を行ない、設計資料を得ようとしたものである。まずすきまが異なる場合のピン穴縁の応力集中の変化を調べた結果、ラグの寸法比が異なる場合にはその変化の傾向が変ることを示し、さらにラグの形状が異なる場合の応力集中も求めた。また荷重が大きくなると応力集中は低下すること、そしてこれはラグの剛性の大きさと大いに関係があることなど、ピン穴縁の応力集中に影響を及ぼす要素それについて検討した。なおJR-200系エ

* 昭和49年10月9日受付

** 原動機部

*** 都立航空工業高等専門学校（元原動機部）

ンジンでは、ラグ3枚をもついわゆる3次元構造のピン結合が採用されているので、本研究においても、1枚ラグのほかに、ラグを3枚重ね合せた3次元的なモデルを用いて、応力凍結法で実験を行ない、3枚のラグそれぞれの強度の比についても検討した。

2. 試験片

モデル材料にはエポキシおよびアクリル(理研計器製厚さ6mm)を使用し、前者は応力の大きさを求めるための等色線用、後者は主応力の方向を知るために等傾線観測用として用いた。ピン材料としては黄銅およ

びエポキシを使用した。形状、寸法は図1、表1に示す。それぞれのモデルについて、5~10種類異なる直径のピンを使用した。2次元モデルは、図1(I), (II)の2種類を用いたが、実機ではI)の形状が採用されている。図2は3次元的な考察を試みることを目的として使用したモデルである。図に示すように3枚のラグの間にスペーサーを挿入して接着したものと、接着する代りにピン止めにしたものとの2種類を用いた。本実験では、3枚のラグそれぞれの厚さの比の最適値を実験的に検討することに重点をおいて、それぞれのラグ穴縁に生ずる最大応力を求めようとした。個々の

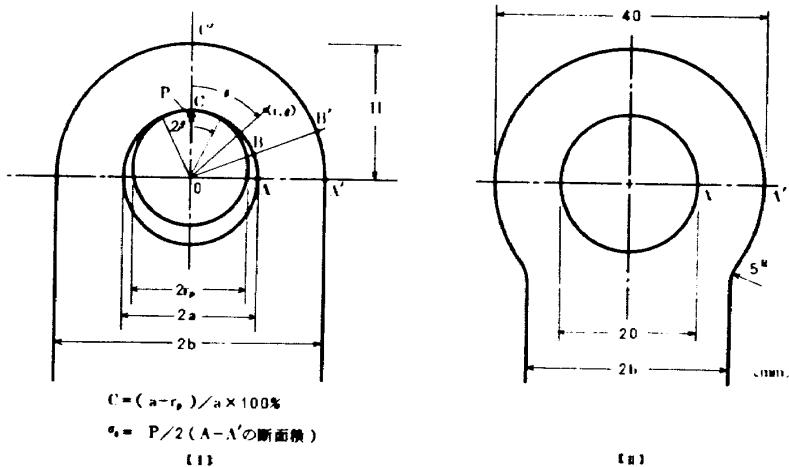


図1 2次元実験用モデル

表1 モデル寸法

	2bm	2an	a/b	Hm	C %
(I)	40	20	0.5	20	0.3~10.0
	"	18	0.45	"	0.3~4.3
	"	15	0.375	"	0.1~8.7
	"	12	0.3	"	0.3~12.0
	70	20	0.286	35	0.3~10.0
	50	"	0.4	25	"
	35	"	0.571	17.5	"
	30	"	0.667	15	"
	44	"	0.455	20	0.3~10.0
(II)	48	"	0.417	"	"
	52	"	0.385	"	"
	35	"		"	0.3~5.3
(III)	30	"		"	"
	25	"		"	"
	40	"	0.5	20	0.1~9.5
3	32	16	"	16	1.2~9.5
次元	20	10	"	10	0.5~9.5

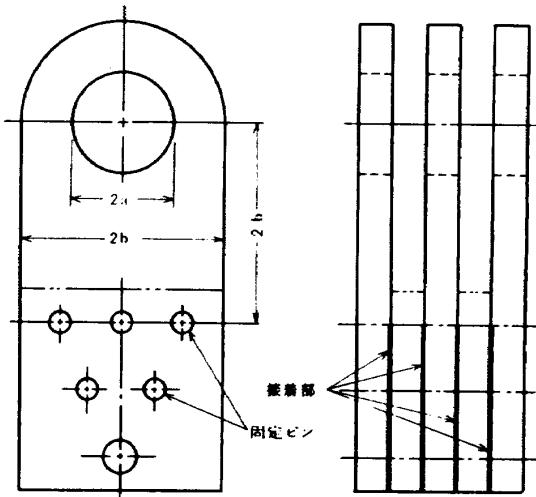


図2 3次元実験用モデル

ラグに生ずる応力分布は2次元の場合と同様になる。モデルの加工は材料に直接けがき、大略ヤスリで削り最後は紙ヤスリで所定の寸法に仕上げた。丸穴は仕上精度が重要なので、ドリルで下穴をあけ、さらにこれにリーマを通してピンとの接触をなめらかにした。

3. 実験装置および方法

実験には理研計器の標準型光弾性装置（口径300mm）および3次元応力凍結炉を使用した。

エポキシの光弾性感度の測定は、常温の場合は実験が簡単で計算も容易な帯板の4点曲げの実験から求め、凍結法の場合は円板の圧縮の実験から求めた。

2次元実験に使用した負荷方法を図3に示す。ピン穴周囲全体を観測するために、図に示すよう(a), b) 2種類の装置を用いた。両方法とも負荷状態を自由に調節できる。なお、両者による縞次数の差は認められない。ところでエポキシは加工の際若干の縁応力が生ずるので、これを除去するために、実験に供する直前に焼鈍した。また焼鈍後長時間放置しても縁応力を生

じ、境界上の縞模様のみだれの原因となる。したがつて、本実験では焼鈍後2時間以内に実験を完了させることとした。2次元実験において、荷重を加える時、ピンと穴との接触部がなめらかであることを確認し、縞模様が左右対称でしかも板厚方向の曲げ応力を生じないよう行なう必要があるので、その点は特に注意した。曲げ応力の有無は縞模様のみだれから直ちにわかる。縞次数の測定は衝立に縞模様を投影して求め、1次以下の端数は、ターディー法および外挿法併用して読み取り、さらに写真撮影後、フィルムを投影機で拡大するか、または印画紙に焼付して測定した。また、明視野、暗視野両方の縞模様を写真に撮り、両者から縞次数を読み取ることでさらに測定精度を上げた。なお負荷状態のまま放置すると、時間の経過とともに若干変形が進む傾向がある。したがつて、負荷の始めから縞次数の測定まで、なるべくすみやかに行ない、しかも総ての試験片について、負荷時間が一定となるように注意した。

3次元的な応力を測定する場合には、上記の2次元の場合に適用した常温で負荷する方法は不可能である。この3次元実験は、通常行なわれるような厚さ方向の応力分布を求めるのではなく、3枚のラグそれぞれに生じる応力を、2次元的に求めることになるので、一

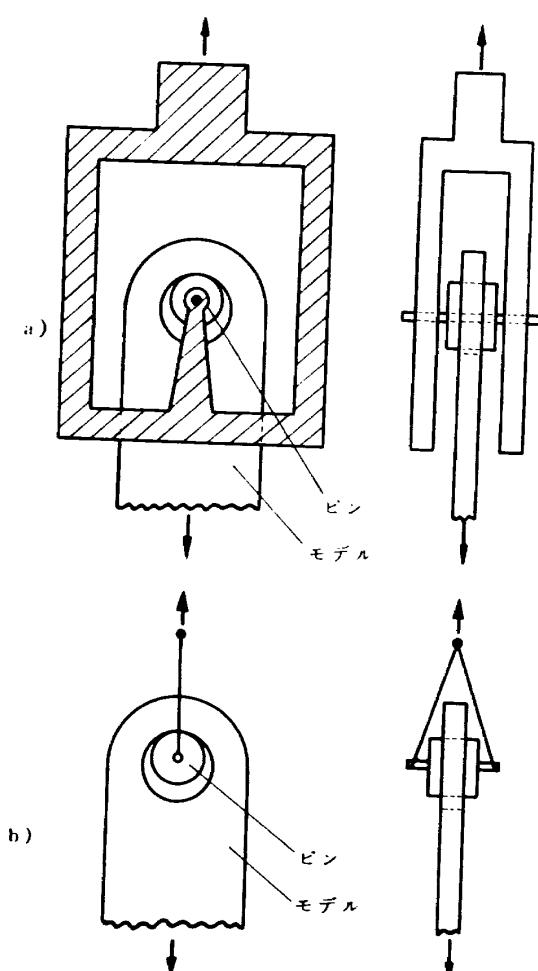


図3 2次元実験負荷方法

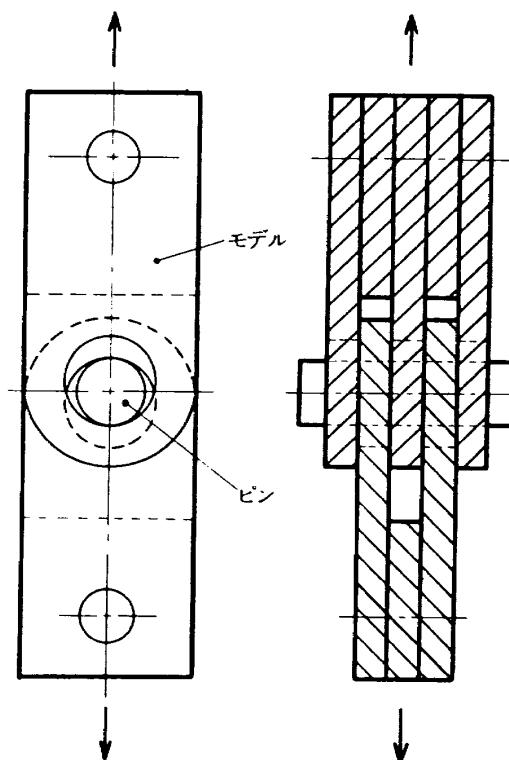


図4 3次元実験負荷方法

般の3次元実験より簡単になるが、やはり凍結法を採用する必要がある。実験は図4に示すようにピン結合した組合セラグに負荷する方法で行なつた。そして応力は凍結後3枚のラグを切り離して、2次元モデルと同様の方法で縞次数を読み取つて求めた。モデルを製作する場合に、3枚のラグを接着する代りに、それぞれのラグをピンで固定したモデルを用いて同様の実験を行なつたが、その結果は接着した場合とほとんど差が見られない。むしろ接着モデルの場合よりも測定精度を上げることができた。さらにピン固定モデルの場合は、同一モデルを再使用することができる利点がある。2次元実験に使用したピン材料は、黄銅およびエポキシの2種類を使用したが、両者による縞次数の差は、ほとんど見られなかつた。3次元実験にはエポキシのみを使用した。特に3次元実験の結果はピンの曲げ変形の大小に左右されるので、実機との対応を考慮してラグ材と同一材質のピンを使用した。なお、ピンの曲げ変形の影響は、直径の異なるピンを使用することで検討することにした。2次元モデルの場合にも金属との弾性定数の相違から、このような変形の影響が問題となるので、特に荷重の影響を調べる場合を除いて、なるべく変形の影響を少なくするために、最高縞次数が4～5次程度になるような荷重で実験を行なつた。

4. 実験結果

ピン穴縁の応力分布を決定する要素として、ラグの形状、ピンとピン穴とのすきま、ピン穴径とラグ巾との比および荷重などが考えられる。さらに、3次元的な実験を光弹性で行なうとすれば、弾性定数の相違から、当然変形量なども考察の対象となる。またピンと穴との接触部の応力分布を正確に求めることは、光弹性実験のみでは困難である。⁵⁾しかし一方ピン結合の破壊試験によれば、すきまがかなり大きい場合(10%)でも、最初のクラックはピンの接触部分には起らなくて、図1のB点(縞次数が最大になる点)付近に生ずることが示されている。すきまが大きくなれば、ピンの接触領域は狭くなり、圧力分布は集中荷重に近づくのであるから、当然接触点の圧縮応力は大きくなる。しかし、ピン穴の接線方向の応力も圧縮なので、面内の剪断応力はあまり大きくならない。このことは、破壊は剪断応力が最大になる点から起るという最大剪断応説がピン結合の場合にも成立することを意味している。したがつて、これらのこと考慮して、本報では

穴縁のクラック発生点(図1内のB点)に重点をおき、その点の応力を検討することとした。もちろんすきまが小さい場合は、明らかにB点が最大応力となるので、本報で行なう光弹性実験においては、B点に生ずる最大縞次数の大小でピン結合の強度を論じてもよいことになる。

4.1 2次元実験結果

図5はピン穴縁および外周上の縞次数分布の一例である。すきまが0.4%と10%の場合が示してある。すきまによる分布の様子が異なることがわかる。縞次数は通常正の値で表わすが、この場合圧縮応力を生ずる領域では負として図示した。すきまが大きくなると前述のように、ピン接触部は大きい圧縮応力を生ずるが、縞次数で表わすとやはり最大値は接触部以外の点すなわち、図のB点に生ずることがわかる。この傾向は寸法比a/bが異なる場合でも同様である。なお荷重Pは単位厚さ当たりの値で表わし、N₀はピン穴中心を通る最小断面の平均応力 σ_0 に対応する縞次数である。図6は断面の応力分布を描いたもので、すきまが2種類異なる場合(C=0.3%, 10%)の一例を図示した。断面の応力の求め方としては、まずアクリルを用いてモデルを製作し、エポキシの場合と同様の実験を行ない、主応力の等傾向線図を描き、これから主応力の方向φを求める。一方、自由境界上の応力σは縞次数から、 $\sigma = N/Ft$ として求まる。ここでN, F, tはそれぞれ縞次数、光弹性感度、板厚を表わす。このようにして求めたφ, σを利用して2次元の釣合方程式および関係式

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0$$

$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\phi$ から、図式積分法を用いて $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ を計算し、座標変換によつて、円柱座標で表わされる $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ を求めた。ここで、 σ_1, σ_2 はそれぞれ第1、第2主応力である。このようにして、両端に自由境界をもつ断面の応力はかなり正確に計算できるが、ピンの接触部のように、自由境界をもたない断面の応力分布は境界条件すなわちピンの圧力分布が不明の場合は求められない。そこで本報では、ピンの接触部はヘルツの接触理論が成立するものと仮定して便宜的にピンの圧力分布を求め、これを境界条件として接触部の応力分布を求めた。もちろんヘルツの理論と本実験とでは負荷条件が異なるので、接触部の応力はあくまでも推定値にすぎない。

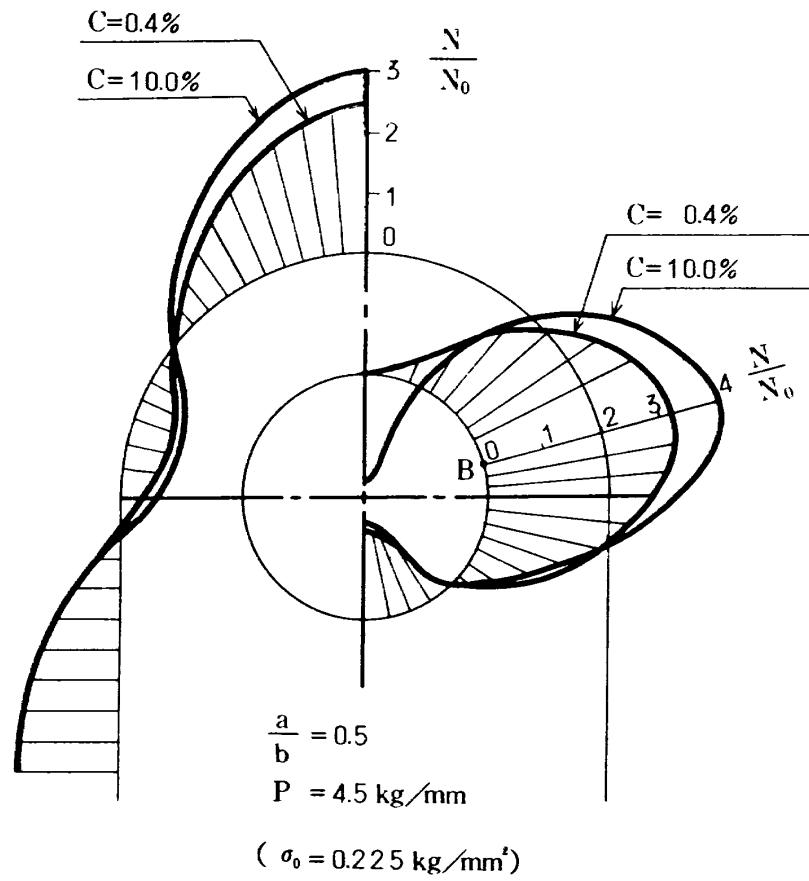


図 5 周辺上の繰次数分布

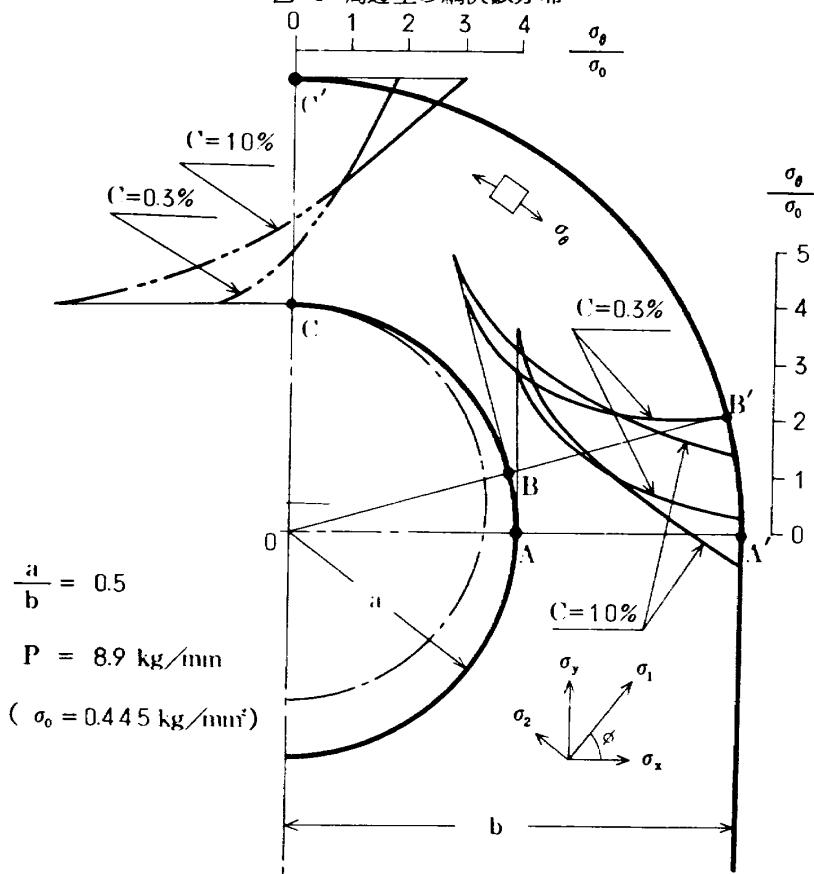


図 6 2次元断面内の応力分布

(図6の2点鎖線で示す)なおヘルツ接触の場合は曲げモーメントが作用しないので、O点でのピンの圧力は本報の場合より大きくなることが予想される。したがつて、O点の応力は実際より高めに評価したことになる。

以下にすきま、荷重、接触角、ラグ形状および寸法比などピン穴縁応力に影響を及ぼす各要素による応力の変化、主として最大応力の変化について検討する。

4.1.1 ピンとピン穴とのすきまの影響

図7にすきまと穴縁の最大応力との関係を示す。この図は、ラグ巾 $2b$ を一定(40mm)として、ピン穴直径 $2a$ がそれぞれ20, 18, 15, 12mmの場合の図を描いたものであり、荷重をパラメタとしている。縦軸は穴縁の最大応力 σ_{max} とピン穴中心を通る最小断面の平均応力 σ_0 との比であつて応力集中係数に相当する。図から明らかなように、 $2a$ が大きいときはすきまが大きくなるにしたがつて、穴縁の応力は急激に増大し、

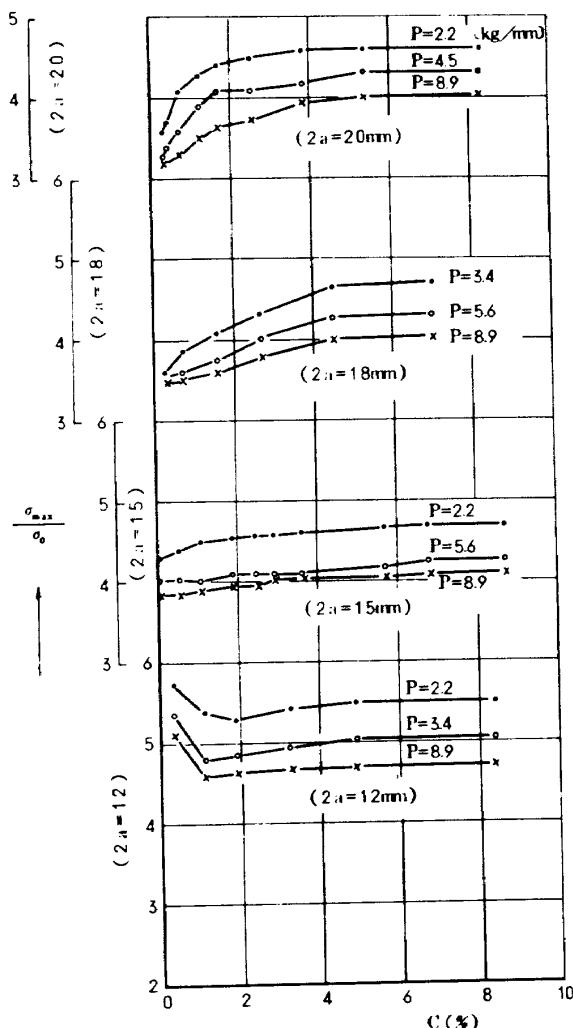


図 7 すきまの影響($2b = 40\text{ mm}$)

ある程度大きくなると一定値に近づく、 $2a$ が15mmになるとすきまの影響はほとんどなくなり応力はほぼ一定となる。さらに $2a = 12\text{ mm}$ になるとすきまの影響は、 $2a$ が大きい場合と異なり、すきまが小さいとき、逆に応力は高く、その後すきまの増加とともに減少し、さらに大きくなると、わずかに増加して一定となる。この変化の物理的解釈は考察の項で述べる。

4.1.2 荷重の影響

ピンに加える荷重の大きさによって、穴縁の最大応力がかなり変化することは、図7を見ても明らかであるが、すきま一定のときの荷重と最大応力との関係をさらに明確にするために、両者の関係を図8に示した。図7と同様にラグ巾 $2b = 40\text{ mm}$ 一定の場合である。図から明らかなように、穴径 $2a = 20, 18, 15, 12\text{ mm}$ の3種の場合には、荷重の増加とともに穴縁の応力は減少する。この変化はすきまが異なつても同様になる。しかし穴径が 12 mm になると、他の変化と異なつて、荷重

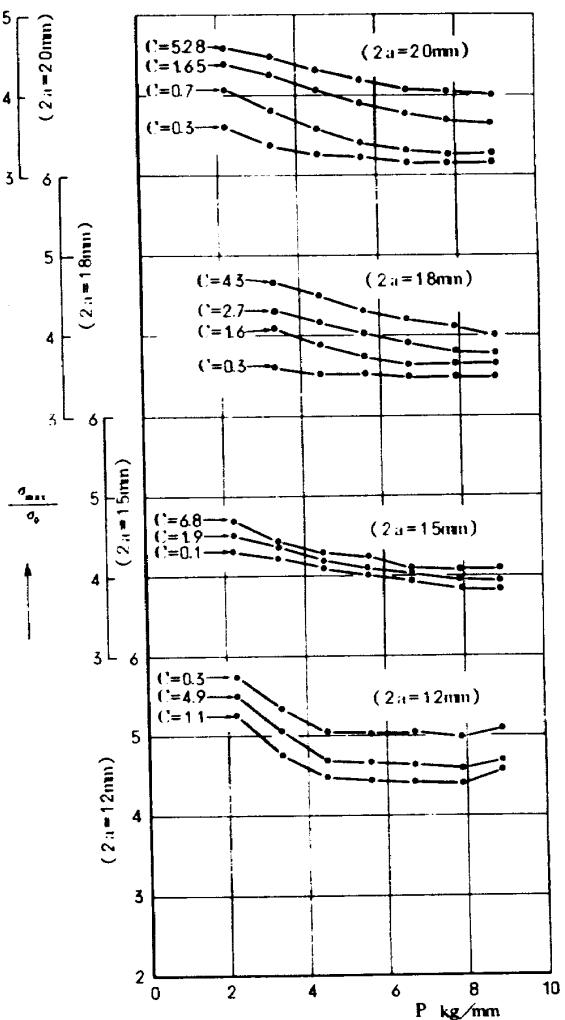


図 8 荷重の影響($2b = 40\text{ mm}$)

がある程度大きくなると応力は増大する傾向になる。またこの場合すきまの大小と応力の大小関係が、前3者の場合と異なることなどが特徴的で、このことは図7からも推測される。

4.1.3 寸法比(a/b)の影響

ビン穴とラグ巾との寸法比(a/b)も穴縁の応力に影響を及ぼす重要な要素であることは、図7によりある程度予想できるが、ここでは寸法比の影響を同一荷重条件のもとに検討するために、ビン穴中心を通る最小断面(図1のA-A'断面)の平均応力 δ_0 が一定となるような荷重を、それぞれのモデルに加えて実験し、その結果を比較検討することとした。モデルはビン穴径 $2a=20\text{mm}$ 一定として、ラグ巾がそれぞれ70, 50, 40, 35, 30mmのものを使用した。この場合の光弾性縞模様の例を写真1に示す。図9にすきまと穴縁の最大応力との関係を示す。ラグ巾 $2b$ の大きさによつて変化の様子が異なることがわかる。 $2b$ が小さ

い場合(30mm)はすきまが増すにつれて応力は急激に上昇するが、 $2b$ が大きくなるにつれて、その変化はゆるやかになる。そして、 $2b=70\text{mm}$ の場合には、すきまによる変化の傾向は逆になつて、すきまが小さいとき($\gamma=0.3\%$)応力は高く、 γ の増加とともに応力は減少し、その後また上昇する。この傾向は図7の $2a=12\text{mm}$ の場合と同様である。またいずれの場合もすきまが大きくなると、それぞれ一定値に近づく。図9では $\gamma=4.9\%$ までしか描いてないが、実験ではこれ以上 γ が大きくなつても応力に変化がないことを確認してある。図10はすきまをパラメータとし、寸法比(a/b)と応力との関係を示した図である。この図からすきまの相違によつて寸法比と応力との関係がかなり異なることがわかる。すきまが小さいとき($\gamma=0.3\%$)、寸法比の増加とともに応力は減少するが、大きくなると減少から増加へと変る。 $\gamma=4.9\%$ は、すきまとしてはこれ以上大きくしても、応力は変化しな

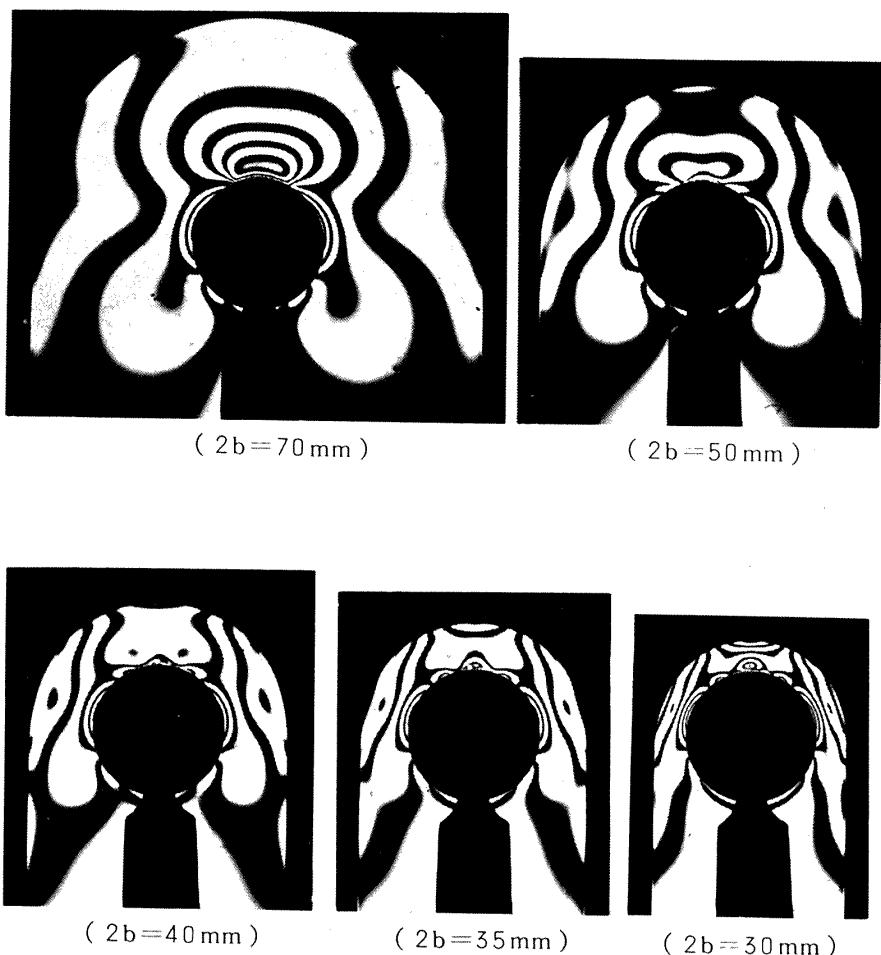


写真1 光弾性縞模様 (a/b が異なる場合)
[$2a=20\text{mm}$, $c=34$, $\sigma_0=0.167\text{kg/mm}^2$]

いことを確認しているので、この場合一応 $C=4.9\%$ の曲線を応力の上限と考えてもよい。

4.1.4 ピンとピン穴との接触幅の影響

ピンに加わる荷重およびすきまが、共通に影響を与える変数量として、ピンとピン穴との接触巾が考えられる。すきまが小さい場合はもちろん接触領域は広く

なる。またすきまが同一の場合でも荷重が大きくなると、ラグの変形のために当然広くなる。そこで接触領域と応力との関係を調べるために、ヘルツの接触理論によつて、便宜的に接触巾を求め、これと応力との関係を図11に示す。この図は前項で述べた結果を、接触巾と応力との関係に書き直したものである。ラグ巾

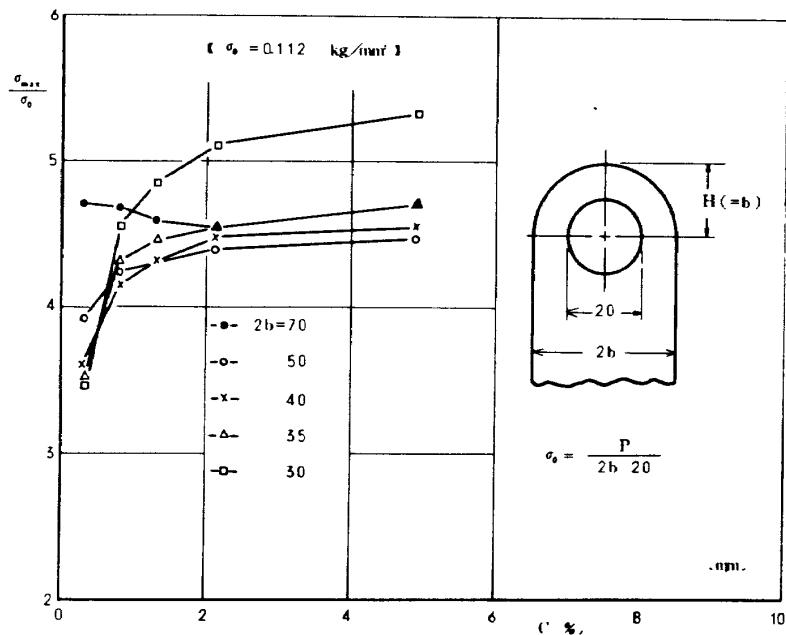


図 9 ピン穴縁最大応力とすきまとの関係 ($2a = 20 \text{ mm}$)

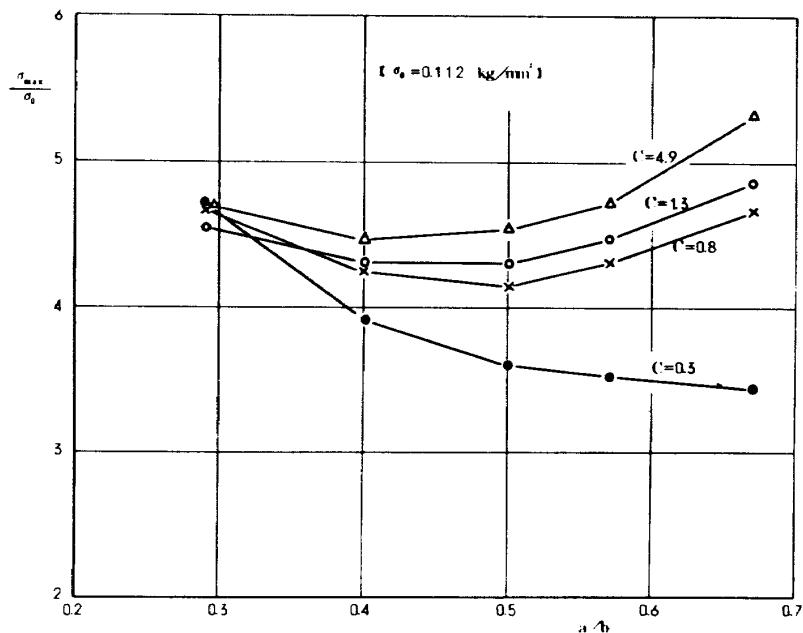


図 10 寸法比 a/b の影響 ($2a = 20 \text{ mm}$)

$2b$ が異なるとかなり変化の様子がわかる。平均応力はそれぞれ同一であるが、ラグの曲げ剛性が異なるので、変形の影響が大きい。 $2b=30$ の場合はかなり急激な変化をするが、 $2b=70$ になると変化は少なくしかも傾向が逆になる。このことは図 9 のすきまと応力との関係と同様である。なおここで求めたヘルツ

の接触巾は、曲げ変形を考慮していないので、 $2b$ が小さい場合のように変形が大きいラグの場合は、ヘルツの接触巾より実際はかなり大きくなっていることが予想される。これらのこととを考慮すれば、実際の接触巾と応力との関係は図に示したほど急激な変化はしない。また曲げ変形による接触巾の増加量は、ラグの曲

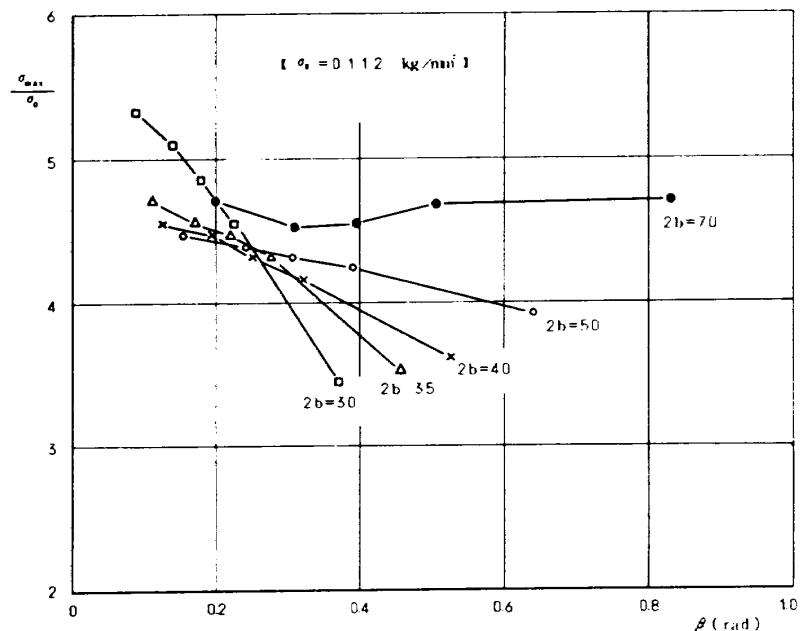


図 1 1 ピン穴縁最大応力と接触角との関係 ($2a = 20$ mm)

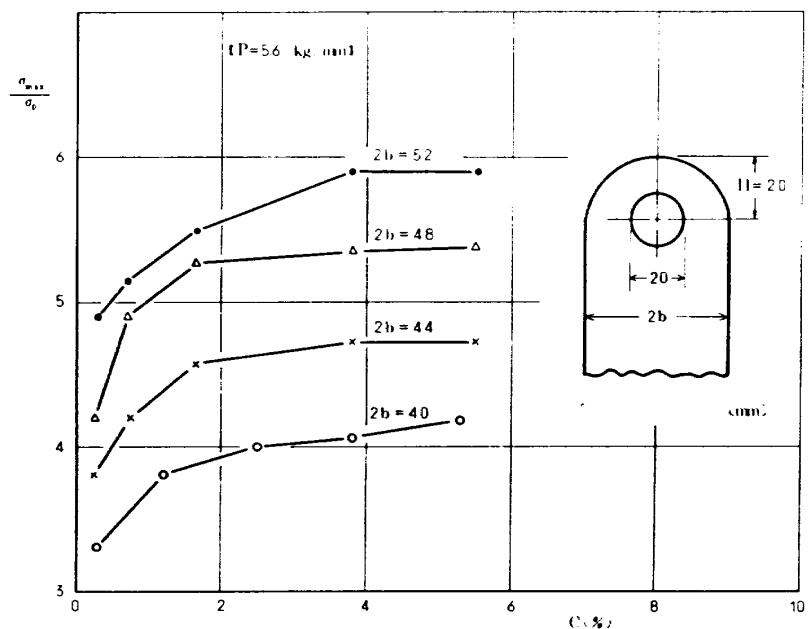


図 1 2 すきまの影響 ($H = 20$ mm, $2a = 20$ mm)

げ剛性の大きさに左右されるので、 $2b$ が大きくなれば当然少なくなる。

4.1.5 ラグ形状の影響

前項まではビン穴とラグ外周が同心円の形状のラグについて検討してきたが、ここではビン穴が同心円からはずれた場合の一例として、ビン穴中心とラグ先端との距離 $H = \text{一定}$ (20mm) およびビン穴径 $2a = \text{一定}$ (20mm) として、ラグ巾 $2b$ が 4 種類異なる場合の穴縫の最大応力を検討した。その結果を図 1-2 に示す。すきまと応力との関係は、同心円形状ラグの場合と同様に、すきまが増すにつれて応力は増加し一定値に近づく。そしてラグ巾 $2b$ が大きくなると全体として応力は高くなることがわかる。

次に形状が明らかに異なる例として、図 1 (II) に示すようなアイボルト形のモデルを使用し、同様の実験を行なつた結果を図 1-3 に示す。この場合の光弾性縞模様の例を写真 2 に示す。なおビン穴径 20mm およびビン穴中心を通るラグ巾 40mm はそれぞれ一定としている。この場合も最大応力はやはり B 点付近に生ずる。すきまの影響は前図と同様になり、ラグ巾 $2b$ が狭くなるにつれて応力は高くなることがわかる。この結果は、 $2b$ の大小とラグの曲げ剛性との関係を考慮すれば理解できる。

4.2 3 次元実験結果

3 章で述べたように本報で行なつた 3 次元実験は、通常行なわれる板厚方向の応力分布を求める実験では

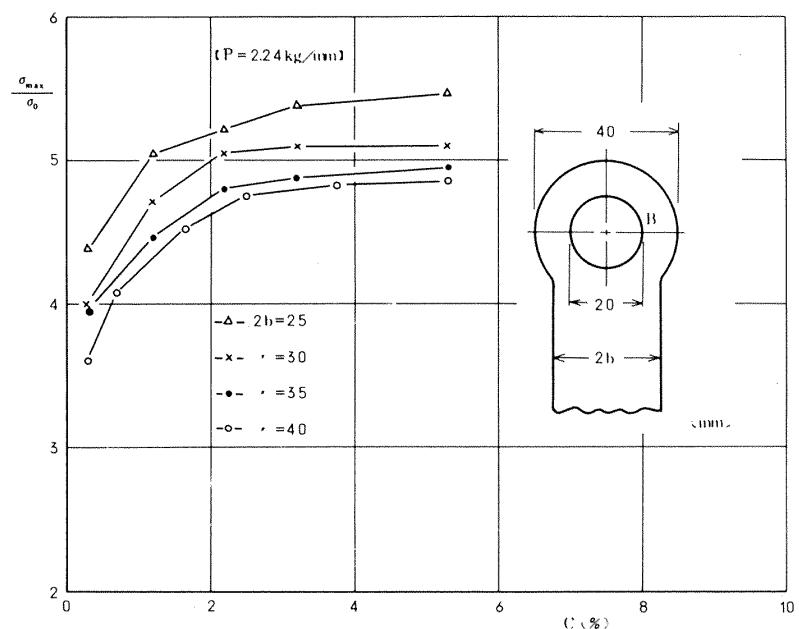


図 1-3 すきまの影響 ($2a = 20\text{ mm}$)

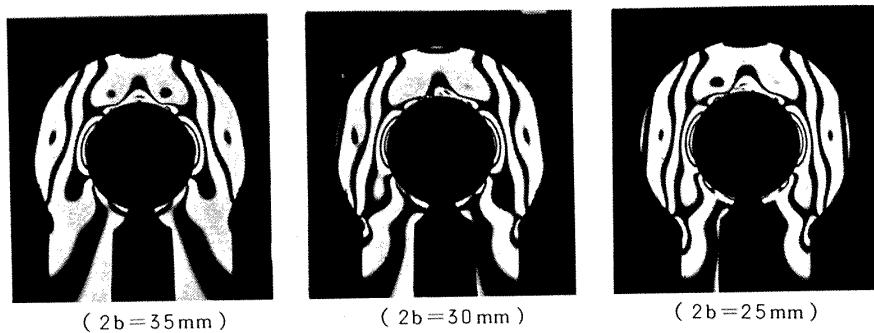


写真 2 光弾性縞模様
[$2a = 20\text{ mm}$, $c = 3\%$, $\sigma_0 = 0.167\text{ kg/mm}^2$]

なく、厚さが一様な3枚のラグと2枚のラグとをピンで結合した場合、3枚ラグのそれぞれに生ずる最大応力を比較検討したものである。それぞれのラグに生ずる応力は、2次元の場合と同様になるので、3枚ラグのうち両端ラグと中央ラグとの応力比とすきまとの関係およびピンの剛性の影響などを調べようとした。それらの結果を図14に示す。縦軸の r は、両端ラグと中央ラグの穴縁に生ずる最大応力の比を表わす。ピンの曲げ変形によつて中央ラグの方が両端ラグより大きい負荷を受ける結果、当然中央ラグの応力が高くなる。ここで両端ラグの応力は両者の平均値をとつた。図には $2a=20, 16, 10\text{mm}$ の3種の結果を描いているが、寸法比(a/b)は0.5にとつてある。したがつてラグ巾 $2b$ はそれぞれ40, 32, 20mmである。3者ともすきまの影響はほとんど無いと云える。ピン穴 $2a$ が異なるので、その中にに入るピンの大きさもそれぞれのラグに見合つた大きさになつていて、ピン自身の曲げ剛性は当然変る。寸法比(a/b)は3者同一だから、3者の応力比の相違はピンの曲げ剛性の相違に起因するものである。このことは曲げ剛性の大きいピンを使用した場合($2a=20\text{mm}$)は高く、小さい場合は低くなることから明らかである。そして定性的には、剛性無限大のピンを使用すれば、応力比は1になり、逆に剛性が零に近いピンの場合は0.5に近づくと云える。

5. 結果の考察

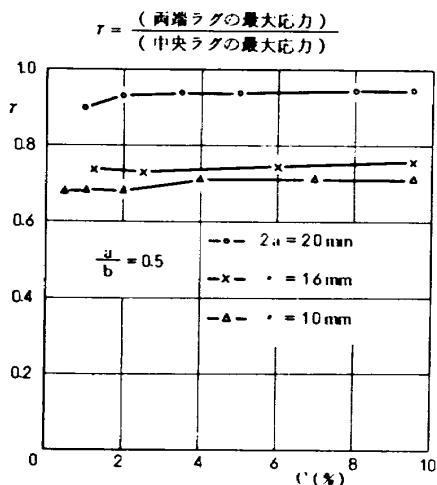


図14 3次元グラフの応力比とすきまの関係

これまでビン穴縁の応力集中に影響を及ぼす各要素それについて、その実験結果を説明してきたがここでこれらの結果を総合して物理的考察を行なうことにする。まずビンとビン穴とのすきまが大きくなると接触巾が小さくなり、最大応力点の曲げモーメントが増大するので、ビン穴自身の変形による応力緩和が生ずるにもかゝわらず応力集中は増加する。次に荷重が大きくなるとラグは剛性に見合つた変形をし、応力緩和および接触巾の増加による曲げモーメントの減少によつて応力集中は低下する。また形状が異なる場合にも、ラグの剛性の大小に関する変形が最も応力集中に影響するので、ラグに作用する曲げモーメント、接触巾および応力緩和などの相違を考慮することによつて、応力集中の変化を定性的に説明することができる。

以上のように接触巾、曲げモーメント、剛性、応力緩和などの要素の影響を比較検討することによつて、ビン穴縁の応力変化の様子を大体説明できた。しかし上述の定性的解説で説明できない現象として、寸法比(a/b)が比較的小さい場合($a/b=0.3$ 、図7の $2a=12\text{mm}$ および図9の $2b=70\text{mm}$ の場合)のすきまと応力との関係がある。つまりすきまがある値のとき応力は最低となつて、その前後のすきまではいずれも応力は高い。このような応力変化は比較的曲げ剛性の大きいラグの場合に見られる。この現象を説明するために、上述の要素の他に次の要素を導入する。すなわち、ピンの圧力によつて接触領域には大きい圧縮応力が生ずるが、ごく近傍の非接触領域には引張り応力が生ずる現象がある。このような圧力による非接触領域の応力分布は弾性論で計算されている。⁶⁾しかしこの計算は本実験の場合と負荷条件が異なるので、そのまま適用することはできないが定性的な考察を試みることは可能である。このピン圧力による応力を導入すると a/b が小さい場合の応力を物理的に説明できる。すなわち最大応力点(図1のB点)では、すきまが大きいときはピンは点接触に近いので曲げの影響が大きく、逆にすきまが小さい場合は接触領域がB点に近づくので、曲げ応力の減少よりピン圧力による応力増加の影響の方が大きくなつて結局応力は高くなる。そしてすきまが両者の中間の場合($t=1\sim 2\%$)は、曲げおよびピン圧力ともにその影響が少なく応力は低い。この非接触領域へのピン圧力の影響は a/b が大きいラグにも当然生ずるが、この場合はラグの曲げ変形の影響の方が大きくなつて、ピン圧力の影響は目立たなくなるものと解釈できる。以上の物理的考察はあくまでも定性

的な推測にすぎないが、現在進めている理論計算においても、寸法比 a/b が小さい場合は本実験と同様の傾向を示す結果が得られているので、後日改めて検討することとする。

以上述べたように、ラグの変形は応力集中にかなり影響を及ぼしている。事実、荷重が大きい場合の応力集中は軟鋼の場合より低くなる。しかし最高繰次数が4~5次程度の荷重条件で行なつた結果(図9~11)は軟鋼の結果と大体一致している。

6. まとめ

ピンで結合された軸流圧縮機の動翼結合部の動翼側の強度を検討するために、2次元光弾性法によつて、ピン穴縁の応力集中を求めた。そしてこの応力集中を決定する要素として、ピンとピン穴とのすきま、ピンに加わる荷重、ピン穴直径とラグ巾との寸法比、ラグの形状およびそれらにともなうラグの曲げ剛性、ピンとピン穴との接触領域などをとりあげて、それぞれの要素と応力集中との関係を詳細に検討した。以下にその結果を要約する。

- (1) ピンとピン穴とのすきまが大きくなるにしたがつて応力集中は大きくなり一定値に近づくが、ラグの剛性が大きい場合はほとんど変化しない。
- (2) ピンに加わる荷重が大きくなるとピン穴との接触巾が大きくなり、またピン穴自身の変形のため応力集中は低下する。
- (3) ピン穴直径($2a$)とラグ巾($2b$)との比(a/b)が異なるラグのすきまによる応力集中の変化を明らかにした。その結果、 a/b が大きい場合(0.67)は応力集中の変化が大きく、逆に小さい場合(0.29)にはほとんど変化しない。
- (4) ラグ形状が異なる場合の例として、アイボルト形のラグ(図1のII)を使用して、すきまと応力集中との関係を調べた結果、ラグの曲げ変形が大きいためにすきまの影響が大きく、応力集中は高くなる。
- (5) 3枚のラグを組合せた3次元構造のモデル実験を行ない、それぞれのラグに生ずる応力を求めた結果、3枚のラグの強度が等しくなるようなラグの厚さ比を推定することが可能となつた。

本報で得られた応力集中の値は、光弾性材料と金属との弾性定数の相違から、若干誤差が予想される。しかし変形の影響を少なくするために低荷重で行なつた実験では、金属の場合と大差ない結果が得られているので、ピン結合部材の設計資料として、参考になるも

のと考えている。

終りに、本研究について始終御検討いただいた、当所原動機部の松木部長、島崎室長ならびに宮地室長に謝意を表します。

文 献

- 1) H.Reissner und Fr.Struch;
Ringplatte und Augenstab,
Ingenieur-Archiv, IV.Band(1933)
- 2) 西田正孝;丸孔の応力集中に関する光弾性的研究。科学研究所報告, Vol.30, №2, PP.49.
(昭和29年3月)
- 3) 神保喜一, 青野比良夫;軸流圧縮機動翼取付部の応力解析(隙間のあるピン接合の場合),石川島播磨技報, 5巻26号, PP.13,(1965)
- 4) Minoru Yamamoto; Stress Concentration Produced by Pin Joint of a Flat Bar, M.Faculty of Tech., Tokyo Met.Univ., №2, PP.32(1952)
- 5) 池田為治, 山岸 崇; 軸流圧縮機動翼取付部の強度についての実験的研究(隙間のあるピン接合部),航空宇宙技術研究所報告, TR-183, (1969)
- 6) S.Timoshenko and J.N.Goodier;
Theory of Elasticity,(1951),
PP.102.

航空宇宙技術研究所報告 403号

昭和 50 年 1 月 発行

発 行 所 航 空 宇 宙 技 術 研 究 所
東 京 都 調 布 市 深 大 寺 町 1880
電 話 武 藏 野 三 鷹 (0422)47-5911 (大 代 表) ●182

印 刷 所 株 式 会 社 東 京 プ レ 斯
東 京 都 板 橋 区 桜 川 2~27~12
