

ISSN 0389-4010
UDC 620.172:
539.37

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-681

モアレ法による纖維強化複合材料のひずみ分布解析

越 出 慎 一

1981年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. 緒 言	1
2. モアレじまの観察とひずみ分布の解析	2
2.1 しま再生装置によるモアレじまの観察	2
2.2 ひずみ分布の解析	2
2.3 試験片格子の撮影法	3
3. 等方性材料有孔帯板の引張試験による検討	4
4. 繊維強化複合材料への応用	7
4.1 ガラス繊維クロスとエポキシ樹脂の複合材料	8
4.1.1 格子の印刷と試験法	8
4.1.2 試験結果と検討	9
4.2 炭素繊維とエポキシ樹脂の複合材料	9
4.2.1 格子の印刷と試験法	10
4.2.2 試験結果と検討	10
4.3 炭素繊維クロスとエポキシ樹脂の複合材料	12
4.3.1 格子の印刷と試験法	12
4.3.2 樹脂のコーティングによる補強効果	13
4.3.3 試験結果と検討	14
4.4 ガラスチョップマットとポリエステル樹脂の複合材料	17
4.4.1 格子の印刷と試験法	17
4.4.2 試験結果と検討	18
5. 結 言	19
6. 参考文献	20

モアレ法による纖維強化複合材料のひずみ分布解析*

越 出 慎 一**

Analysis of Strain Distribution for Fiber Reinforced Composites by
Moiré Method

by

Shinichi KOSHIDE

ABSTRACT

This paper deals with the analysis by the moiré method of strain distribution on a plane of fiber reinforced composites with high rigidity. The strain distribution is determined from moiré fringe patterns and an electrical resistance strain gage, or fringe patterns which are obtained by a testing procedure using combined specimens. The fringe patterns are obtained by a fringe reconstructor which is an optical spatial filtering system with coherent light.

The method is applied to analysis of strain distribution in strips of aluminum alloy and epoxy resin, with a circular notch, under tension. A comparison of the results with values of theoretical analysis confirms that the method is applicable to the determination of strain distribution on a plane of rigid structural materials, such as composites.

Moreover, the method can be applied to the analysis of strain distribution in tension tests of various kinds of composites, i.e., glass cloth-epoxy, glass fiber-polyester, graphite fiber-epoxy and graphite cloth-epoxy composites, with circular or semi-circular notches. Using the results of the above mentioned tests, this paper discussed the influences of the notch on the mechanical properties of material under tension for each of the above composites.

1. 緒 言

剛性が高く比強度も優れていることから、最近炭素繊維などの強化複合材料が航空機の構造部材として用いられるようになった。しかし、このような材

料の強度特性は非常に複雑であり、厳密な意味で実材料に対する理論あるいは数値的な解析は必ずしも容易でない。したがって、実材料について行われる実験的な解析も重要なになってくる。

一方、ひずみの実験的な解析法としてモアレ法がいろいろな分野に応用されている。とくにしま再生装置、すなわち平行可干渉性レーザ光の回折を利用してしまを観察するなどの方法は、非接触で平板状

* 昭和56年6月25日 受付
** 機体第二部

試験片のある領域全体にわたるひずみ分布の解析ができる利点を持っている。しかし、ひずみの測定感度があまり高くなく、しかもしま模様の変化が面外変位の影響を受けるため、剛性の高い複合材料への適用には問題があった。⁽¹⁾そこで、電気抵抗ひずみ計を併用する方法を考案することにより、モアレ法を剛性の高い複合材料へも応用できるようにした。

なお、複合材料は繊維あるいは樹脂の種類、繊維の方向や状態によって、強度特性のみでなく材料の表面状態や色彩などの外見も各材料によって著しく異なっている。このため、モアレ法を適用するにあたり格子の印刷、試験片格子の撮影などの実際の手法についてもその都度工夫する必要があった。さらに、複合材料の種類によっては、上述の電気抵抗ひずみ計を併用した方法の適用に問題がある場合もあった。このような材料に対しては先の報告⁽²⁾で示した組合せた試験片を用いる方法を改良してひずみを求めることができる。

ここでは、まずこのひずみ解析法並びに実際に行った手法について述べ、アルミニウム合金及び光弾性実験模型用エポキシ樹脂の有孔帯板の引張試験におけるひずみ分布解析の適用例により、これらの方法が有効であることを示した。また、本研究の目的である、円孔あるいは半円切欠きを持つガラス繊維とエポキシ樹脂、同じくポリエステル樹脂、炭素繊維とエポキシ樹脂などの複合材料帯板の引張試験におけるひずみ分布解析にこの方法を応用し、この解析結果の検討を行って各材料切欠き部材の強度特性を明らかにした。

2. モアレじまの観察とひずみ分布の解析

航空機構造用の繊維強化複合材料などは、従来から用いられているアルミニウム合金と同程度の剛性を持ち、また破断までのひずみも数パーセントで比較的変形も小さい。そこで、このような特性を持つ材料の、とくに切欠き部材のひずみ分布を求める目的としたモアレ法による解析法を開発した。ここでは、まずこの方法によるじまの観察並びにひずみ分布の解析法について示す。

2.1 しま再生装置によるモアレじまの観察

モアレのしま模様の観察には He-Ne レーザ光のような可干渉平行光の回折を利用してしま再生装置を用いる。この装置によるモアレのしま模様再生の原理については先の報告に示してあるが、⁽¹⁾まず格子の印刷された平板状試験片の表面を写真撮影し、そのフィルムを上述のしま再生装置に入れてしま模様を観察するものである。この方法によれば、非接触でモアレのしまが観察できるだけでなく、複雑なしま模様の分離、コントラストの改善あるいは高次回折光による測定感度の向上も原理的には可能である。しかし、高次回折光を利用する場合は鮮明なしま模様を観察するための条件が厳しくなり、一般に用いられている小型カメラ用 35 mm フィルムでは必ずしも容易でない。このようなことから、実用的には 1 次回折光によるしま模様を観察している。この 1 次回折光によるしま模様は試験片表面上に印刷された格子（試験片格子）と基準格子を直接重ねたときに現われる干渉じまと同じ性質のものである。したがつて、これからひずみ成分を解析することができる。

2.2 ひずみ分布の解析

以上で示したようなじまは、一般に格子間隔（ピッチ）が異なった 2 枚の格子を格子線がある回転角を持った状態で重ねた場合、すなわちある量の線型ミスマッチ及び回転ミスマッチが与えられた場合のものになっている。このような場合には試験片が変形していなくてもモアレじまが現われる。したがって、ひずみはこの変形前と変形後の試験片格子から得られるじま模様より求めなければならない。そこで、試験片格子のピッチが基準格子のピッチよりもわずかに大きい線型ミスマッチが与えられているとする。この場合には公称垂直ひずみ成分とじまの関係が次の式で表される。

$$\varepsilon_i = \frac{p_s (\delta_{i0} - \delta_i)}{\delta_{i0} \delta_i - p_s (\delta_{i0} - \delta_i)} \quad (1)$$

ここで、 ε_i は i 方向の垂直ひずみ成分、 p_s は試験片格子のピッチ、 δ_{i0} 、 δ_i は i 方向に直角な格子により形成されるじまの i 方向の間隔である。また、 x 、 y なる直交座標系の場合は i が x あるいは y となる。

さらに、式(1)は変形前と変形後の線型ミスマッチ量が同一であるとの仮定から導出されている。しか

しながら、負荷した際に試験片が面外に移動すると、しま再生装置で得られた変形前と変形後のしま模様の変化は変位に関する情報を与えているものであるが、面内変位のみでなく面外変位にも関係したものになる。このような場合には、面外変位によって変形前と変形後とでは線型ミスマッチ量が違ってきてしまう。このために、負荷の際に完全に面外変位を防ぐかあるいはこの変位量を正確に求めない限り、式(1)を用いてひずみを解析しても面外変位による誤差が入り、その精度は保障できなくなる。しかもこの誤差は剛性が高く面内変形の小さい材料の場合には相対的に大きくなる。

このようなことから、ここではまず変形後のしま模様のみを用い、面外移動には無関係にひずみが解析できる次のような方法を導出した。すなわち、いま上述の場合と同じような線型ミスマッチが与えられ、試験片が変形した後のモアレじまが観察されているとすると、この試験片の任意の2点M及びNにおける垂直ひずみ成分としまの関係は式(1)と同じ形の次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}\epsilon_{iM} &= \frac{p_s(\delta_{i0} - \delta_{iM})}{\delta_{i0} \delta_{iM} - p_s(\delta_{i0} - \delta_{iM})} \\ \epsilon_{iN} &= \frac{p_s(\delta_{i0} - \delta_{iN})}{\delta_{i0} \delta_{iN} - p_s(\delta_{i0} - \delta_{iN})}\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、 ϵ_{iM} 、 ϵ_{iN} は点M及びNにおけるi方向の垂直ひずみ成分、 δ_{iM} 、 δ_{iN} はこれらの点の変形後のしまのi方向しま間隔である。

そこで、式(2)から δ_{i0} を消去すると次の式が得られる。

$$\epsilon_{iN} = \frac{E_{iM} p_s (\delta_{iM} - \delta_{iN}) + \epsilon_{iM} \delta_{iM} \delta_{iN}}{\delta_{iM} \delta_{iN} - E_{iM} p_s (\delta_{iM} - \delta_{iN})} \quad (3)$$

$$E_{iM} = \epsilon_{iM} + 1$$

したがって、任意の1点Mにおいて、例えば電気抵抗ひずみ計によりひずみ成分 ϵ_{iM} が求められたとすると、点M及びNにおけるひずみ成分 ϵ_{iN} が求められる。さらに、このようにして各点でのひずみ成分を求めて行けばある領域のひずみ分布が解析できる。またこの場合の電気抵抗ひずみ計によるひずみの測定はしま模様が現われている領域内の任意の場所でよい。しかし、厳密にはひずみゲージが有限の大きさ

で、小さな領域のひずみを測定している。このため、切欠き近傍のようにひずみ分布が急変するようなところはさけ、一様な分布になっている場所で測定する必要がある。またモアレのしま模様から定性的にひずみ分布の傾向を知ることができ、これを利用すればひずみゲージによる測定点の決定も容易にできる。一般に電気抵抗ひずみ計による測定はゲージをはった場所の情報しか得られないが、測定感度が高い。したがって、この方法によれば測定感度の向上も期待でき、 p_s が0.050 mmあるいは0.025 mm程度の格子を用いてもかなり小さなひずみの解析が可能となり、面内変形が小さい場合に対しても適用できるようになる。

一方、試験片の厚さ、マトリックスとして用いた樹脂の種類などにより電気抵抗ひずみ計が使用できない場合がある。これに対しては同一の格子が印刷されたいいくつかの試験片を組合せ、相対的な面外移動がないように拘束し、この内の1本だけが荷重により変形するような方法により解析することができる。この場合、試験片の状態は複雑になるが、同一面内で変形前後のしま模様が観察でき、このしま模様の差が面内変形のみに依存したものとなるので、先の式(1)によって各ひずみ成分が求められる。また、ここでは室温におけるひずみ解析を対象としており、とくに温度変化に対する考慮はしていない。一般に温度変化がある場合あるいは高温の場合には複合材料のひずみ測定への電気抵抗ひずみ計の適用は困難である。しかし、この組合せた試験片を使う方法はこのような場合にも応用できる。

なお、上で示したいずれの方法も実際にひずみ分布を求めるには多くの点におけるひずみを計算する必要があるが、モアレ法は計算式が比較的簡単で、マイクロコンピュータによって容易に行うことができる。

2.3 試験片格子の撮影法

すでに述べたように、ここでは写真撮影したフィルムからしま模様を観察している。またこの試験片格子の撮影はごく一般的な方法で行っている。しかしながら、モアレ法では印刷された格子のピッチ p_s が測定感度に直接影響するので、これを高めるにはできるだけ小さなピッチの格子を使うことが望まし

い。ただこれには印刷技術の面から限度があり、複合材料の場合実用的には p_s が 0.050 mm 程度のものが主に用いられている。このようにかなり小さなピッチの試験片格子像を写真撮影するためには、高解像力フィルムを使用する必要がある。しかし、高解像力フィルムは一般に撮影感度が非常に低い。また、しま再生装置内で可干渉性光の回折スペクトラムを作るには鮮明な格子線像が必要となるので、撮影時のカメラぶれなどを極力防がなければならぬ。このようなことから、後に示す試験例では照明光源として 2 台のアイランプあるいは高出力ストロボフラッシュをステレオ状に配置し、これとモータドライブ装置とを連動させ、短時間露出 (1/500 sec) で試験片格子を撮影する方法を用いた。

一方、電気抵抗ひずみ計の測定値と上述の方法で撮影されたフィルムより得られた変形後のしま模様から、式(3)を使ってひずみ分布を解析する場合には次のようなことも問題になる。式(2)より δ_{i0} を消去して式(3)を得る場合には変形後のしま模様が現われている領域全体で線型ミスマッチ量が同一である、すなわち δ_{i0} は点 M でも点 N でも同じであると仮定している。したがって、この条件を満たすような撮影をする必要がある。これには格子が印刷された試験片表面とフィルム面が完全に平行な状態で撮影されたフィルムをしま再生装置に入れてしま模様を観察しなければならない。もしこれが平行でないとすると、場所によって倍率の違った格子像でしま模様を観察することになるため、線型ミスマッチ量が違ってしまう。そこで、ここでは上述の条件を満たす撮影するために、以下のような簡単な手法を提案し、実際の例に適用した。

一般に使われているカメラではレンズ光軸とフィルム面は十分な精度で垂直になっていると考えられる。したがって、この光軸と試験片表面が垂直になつていれば、この面とフィルム面は平行になる。これに対し図 1 に示す手法を用いた。すなわち、負荷装置などに取り付けて荷重がかけられた試験片表面を撮影する前に、まずこの表面に平面鏡を密着させる。そうするとこの鏡にはカメラの像が映るが、この像は図 1 に示したように鏡の面に対称な位置にできる。これをを利用してレンズ軸と鏡の面が垂直にならぬようカメラの向きを調整する。とくに一眼レフカメラを使用する場合はファインダ内の基準線あるいはマークと鏡に写ったレンズ像の位置を合せると光軸は鏡の面に直角となり、容易にこの調整ができる。調整後この鏡を取り除いて試験片の表面を撮影する。

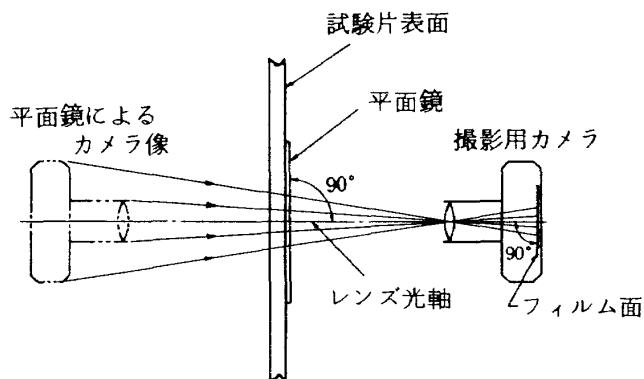


図 1 試験片格子撮影法

るようカメラの向きを調整する。とくに一眼レフカメラを使用する場合はファインダ内の基準線あるいはマークと鏡に写ったレンズ像の位置を合せると光軸は鏡の面に直角となり、容易にこの調整ができる。調整後この鏡を取り除いて試験片の表面を撮影する。

図 2 はこの手法を検討した結果である。この図で(a)は p_s が 0.051 mm (500 本/in) の直交格子が印刷された面を上述の手法で調整し、撮影したフィルムから得られた X 及び Y 格子による線型ミスマッチに関係したしま模様である。なお、 x , y なる直交座標系を考えると、X 格子は y 軸に、Y 格子は x 軸に平行な線で構成された格子を示し、おのおの x , y 方向変位に関係したモアレじまを生じる。直交格子を用いた場合はこの二つのしまが重なって現われる。しかし、しま再生装置の回折光の選択により、図 2(a)に示されているようにこれを容易に分離することができる。さらに、この図の(b)はしま模様が現われている領域の 4 隅及び中央の 5 か所における x 及び y 方向のしま間隔を示したものである。この結果から、これらの模様のしま間隔は縦、横とも場所によらずほぼ一定で、領域全体にわたり一定の線型ミスマッチが与えられていると考えられ、ここで提案した手法が簡単であるにもかかわらず有効であることを示している。

3. 等方性材料有孔帯板の引張試験による検討

前章の 2.において、モアレ法による変形が小さい場合のひずみ分布の解析法として二つの手法、すな

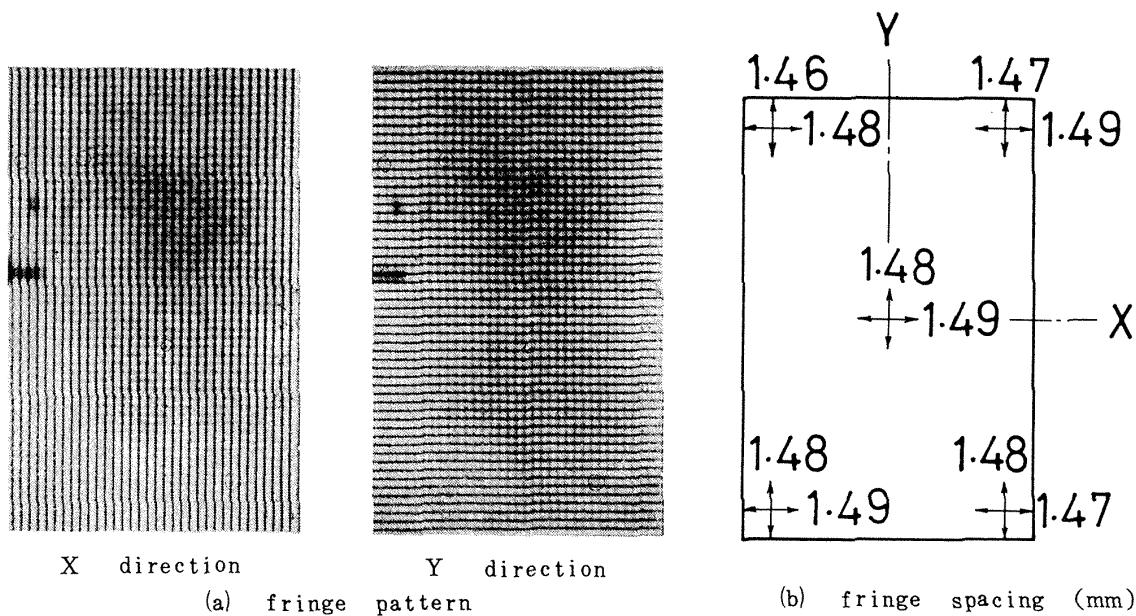


図2 試験片格子撮影法の検討結果

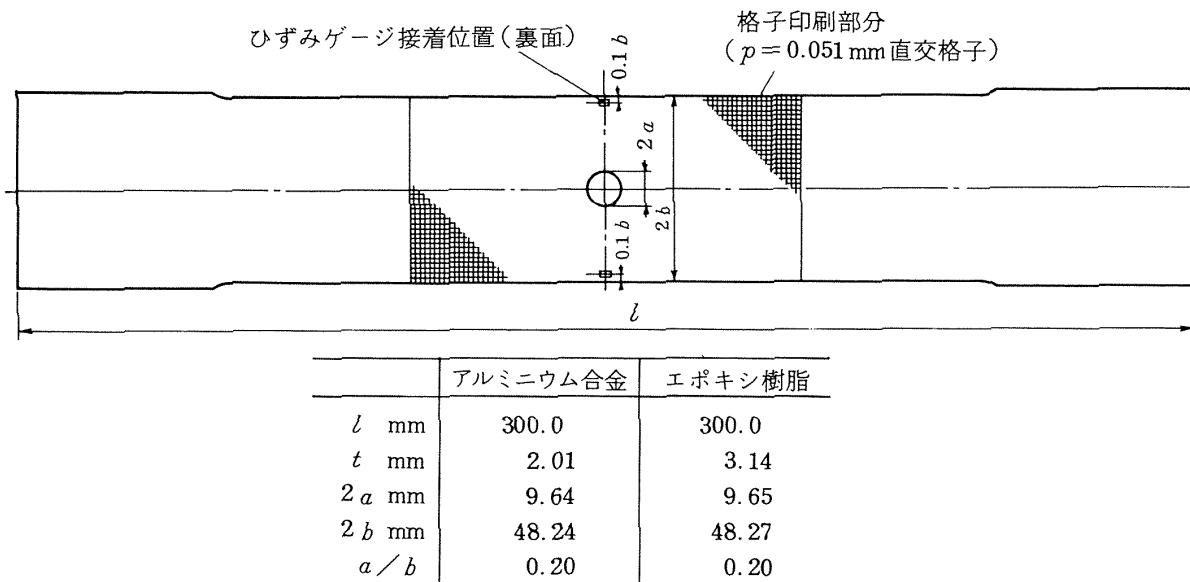


図3 アルミニウム合金及びエポキシ樹脂の有孔帶板試験片

わち電気抵抗ひずみ計と変形後のしま模様のみを用いる手法及び同一の格子が印刷されたいいくつかの試験片を組合せて変形前後のしま模様を同時に観察する手法について述べた。この内とくに後者の手法はすでに高強度耐熱エポキシ樹脂の引張及びクリープ試験のひずみを求めるのに適用され、有効な方法であることが確認されている。⁽²⁾そこで、ここではアルミニウム合金及びエポキシ樹脂有孔帶板の引張試験におけるひずみ分布を前者、すなわち電気抵抗ひずみ計を併用した手法により解析し、その結果を検討

してこの方法が複合材料の特性を知るために必要な領域のひずみ解析に有効であることを確認した。

試験片材料は航空機構造用高力アルミニウム合金(A3P4-T36)及び光弾性実験用エポキシ樹脂で、板厚は前者が2mm、後者が3mmである。図3にはこの試験片の形状を示す。この場合、両材料の試験片とも孔径と板幅の比 a/b は0.2で、縦軸に十分な精度で対称になるように機械加工した。また、これらの試験片は容量10tonの万能試験機(インストロン1125型)を用いて引張試験を行った。

図 4 (a), (b)には引張試験により得られたモアレじまの例を示す。この模様はいずれの試験片に対しても p_s が 0.051 mm の直交格子を用い、しま再生装置の 1 次回折光による引張方向変位に関係したものである。一方、各試験片とも最小断面に沿った線上で、両側から $0.1 b$ となる 2 点の裏面にひずみゲージをはった。ここで使用したのは長さ 5 mm, 抵抗 120Ω , ゲージ率 2.08 の箔塑性ひずみゲージ（昭和測器； Y 11-FA-5）で、シアノアクリレート系接着剤（共和電業； CC-15A）により接着した。またひずみはデジタル式ひずみ計とスイッチボックス（共和電業

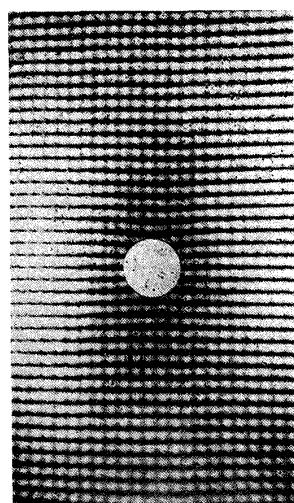


図 4 (a) アルミニウム合金有孔帯板の引張試験におけるモアレじまの例

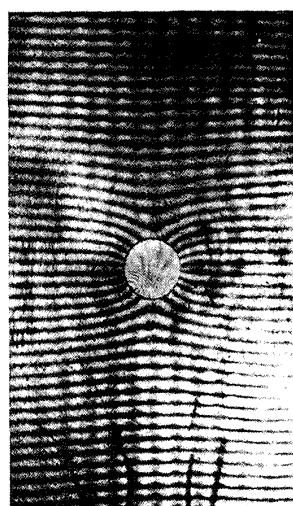


図 4 (b) エポキシ樹脂有孔帯板の引張試験におけるモアレじまの例

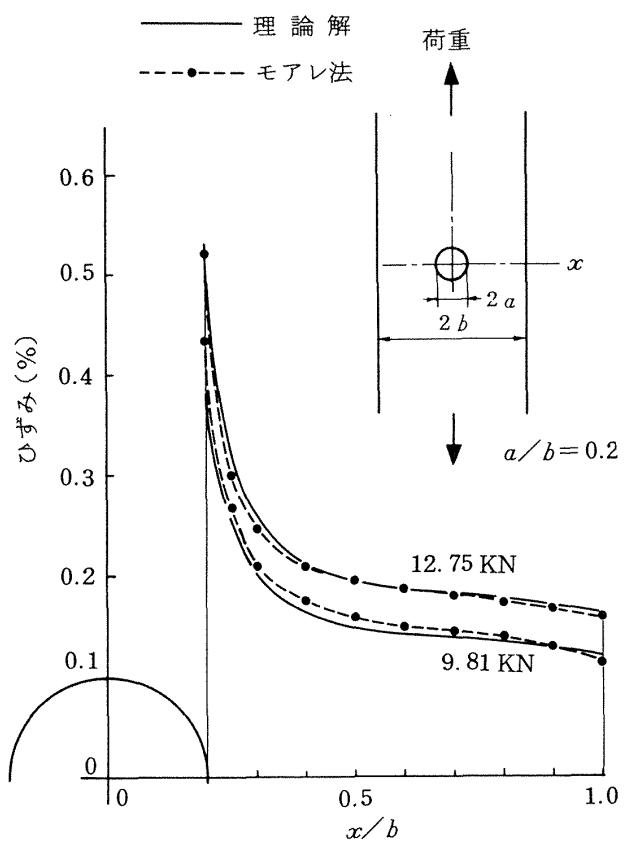


図 5 (a) アルミニウム合金有孔帯板のひずみ分布解析例

; SD-400 A 型及び SS-24 A 型)により、ダミゲージを各ゲージ毎に用意し、2 ゲージ法で測定した。

図 5 (a), (b)には先のしま模様及び電気抵抗ひずみ計で測定した値による、各試験片の最小断面に沿ったひずみ分布の解析例を示す。またこれらの図には各材料の弾性率と有孔無限帯板の理論解析による応力分布⁽³⁾から得られたひずみ分布を比較して示してある。アルミニウム合金の場合、このモアレ法及び理論解析の結果はよく一致している。一方、エポキシ樹脂の場合も荷重の大きいときの孔縁における値を除けばこの両者の結果はよく一致している。なお、図 6 (a), (b)にはここで扱った 2 種類の材料の単純な引張試験片により得られた応力ひずみ線図を示すが、各材料の弾性率はこの応力ひずみ線図の線型領域で求めた。このアルミニウム合金は弹性限のひずみが約 0.47 % である。また図 5 (a)における孔縁の最大のひずみ以外の値はこの値よりも低いので、この図はこの材料の弹性域におけるひずみ分布を示していることになる。一方、エポキシ樹脂の場合は、本材料

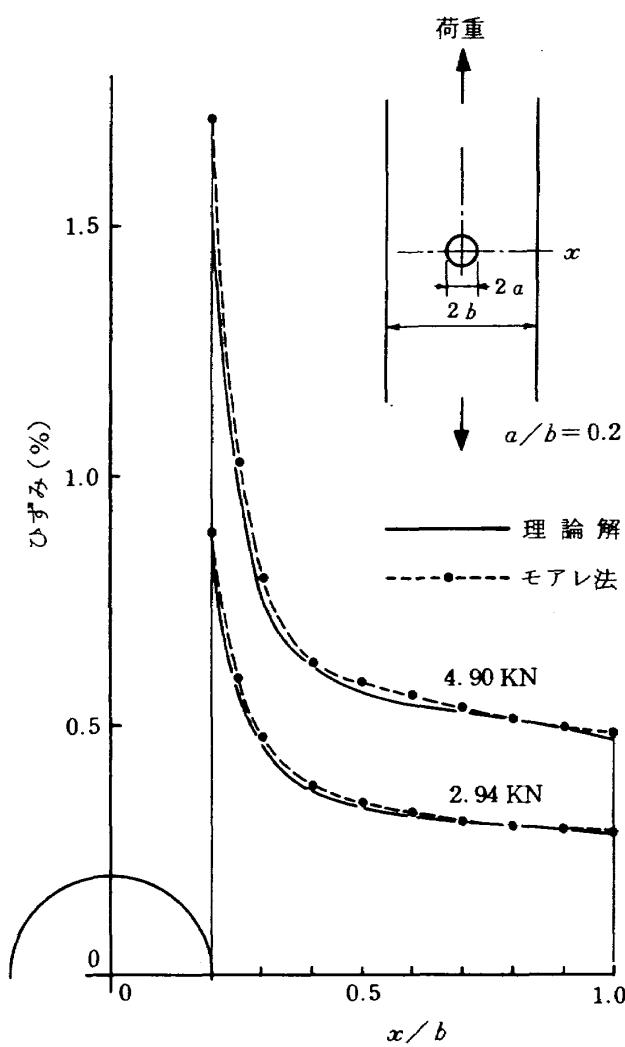


図 5 (b) エポキシ樹脂有孔帯板
のひずみ分布解析例

が室温ではガラス状であり、近似的にかなり大きなひずみ域まで応力とひずみの関係が線型であるとみなされていた。しかし、図 6 (b)の応力ひずみ線図は多少非線型になっていて、ひずみの大きいところでは弾性率が低下している。したがって、図 5 (b)の荷重が大きくなったときの孔縁ではひずみもかなり大きくなるため、モアレ法と理論解析による値との間に差がでてきているが、弾性率を修正すれば一致するものと思われる。

このような結果から、ここで用いた電気抵抗ひずみ計とモアレ法併用した方法は、しま模様の変化を識別できるところからしまが十分に観察できなくなるところまで、すなわちひずみ量に換算して 0.1 %から 3 ないしは 4 %ぐらいまでの範囲のひずみ分布解析に有効であり、アルミニウム合金と同程度の

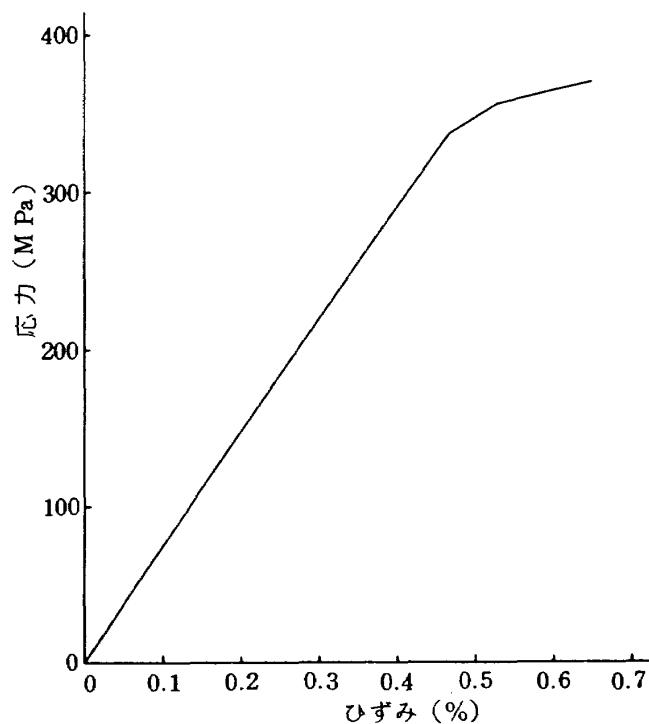


図 6 (a) アルミニウム合金の応力ひずみ線図

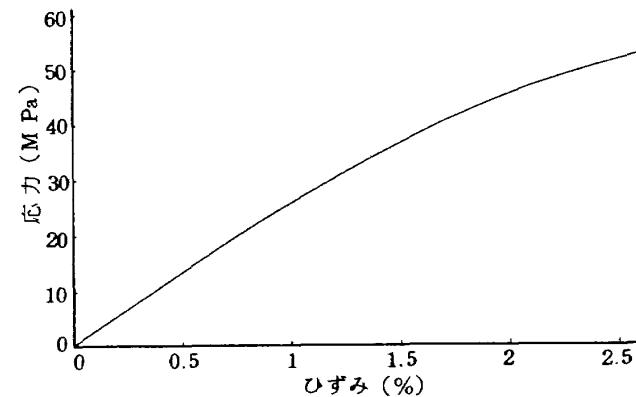


図 6 (b) エポキシ樹脂の応力ひずみ線図

剛性を持ち、3 %前後のひずみ量まで応力ひずみ関係が線型であるような繊維強化複合材料へも十分適用可能であることが確認された。

4. 繊維強化複合材料への応用

現在、構造用材料として各種の繊維強化複合材料が用いられている。ここでは主に航空機構造に使われている複合材料を取り上げ、切欠きを持つ帯板のひずみ分布解析に先に示した方法を応用した。また、これらの解析結果から切欠きが各材料の強度特性に及ぼす影響についての検討を行った。

4.1 ガラス繊維クロスとエポキシ樹脂の複合材料

この材料は航空機の二次構造部材として使用されているガラス繊維平織クロスを強化材料としたものである。図 7 にはこの材料の短冊形引張試験片により得られた応力ひずみ線図を示す。応力とひずみの関係は多少非線型になっており、23~28 GPa の弹性率を持っている。

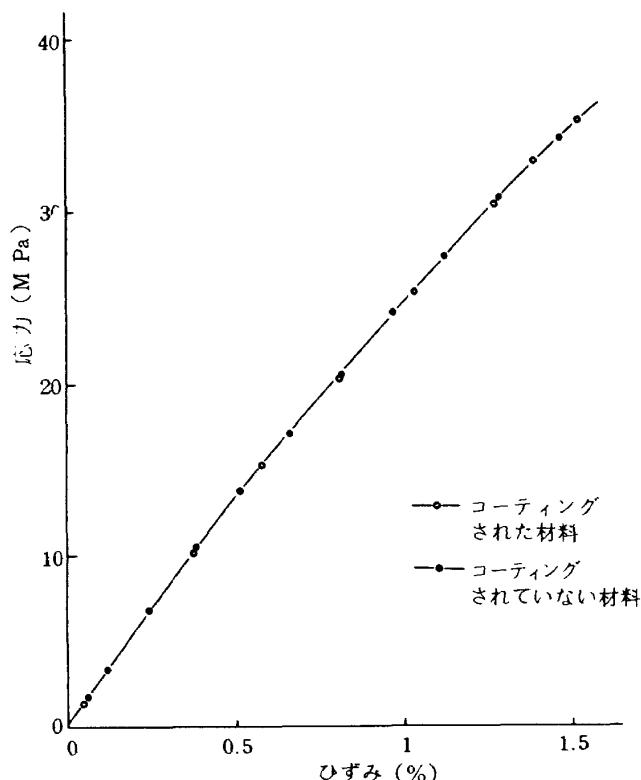


図 7 ガラス繊維クロス強化複合材料の応力ひずみ線図

4.1.1 格子の印刷と試験法

モアレ法を適用する場合、まず試験片表面に格子を印刷する必要がある。とくにこの方法では測定感度の面からできるだけ小さなピッチの格子を印刷しなければならない。しかし、この材料は表面が平滑でなく、このような格子の印刷には適していなかった。そこで図 8 に示したように材料表面にエポキシ系の樹脂（シエル化学；エピコート 828）を薄くコーティングして平滑面を作り、その上にフォトレジスト格子を印刷する手法を用いた。このエポキシ樹脂はコーティングによる補強効果を小さくする必要があったので、重量比で約 30% の多硫化物（チオコール；LP-3）を添加して剛性を低くしてある。また、図 7 の応力ひずみ線図はコーティングされたも

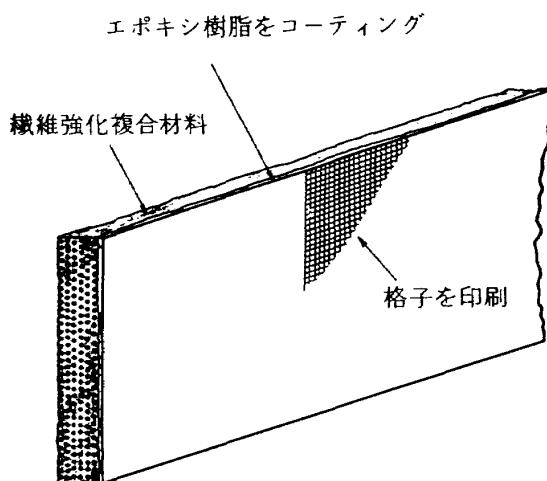


図 8 複合材料表面への格子印刷法

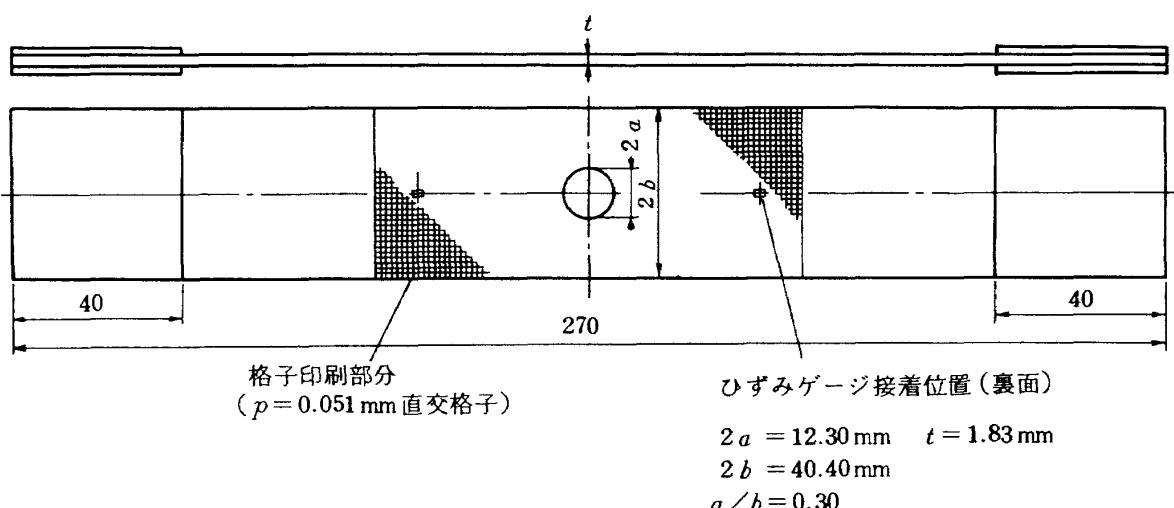


図 9 ガラス繊維クロス強化複合材料有孔帶板試験片

のとされていないものから得られた線図であるが、全く一致しておりこの補強効果はほとんど無視できることが確認された。

図9には有孔帶板試験片の形状寸法を示す。この試験片に対しては容量10tonの万能試験機(島津製作所; RES-10型)により試験を行った。この場合の試験片格子の撮影及びしま模様の観察には2.で述べた方法を適用した。また、ひずみゲージ及びこの測定方法は3.の等方性材料の場合と同様である。

4.1.2 試験結果と検討

図10には板厚約2mm, $a/b = 0.3$ のこの複合材料有孔帶板の引張試験で得られたモアレじまの例を示す。このしま模様もしま再生装置1次の回折光による引張方向変位に関係したもので、 p_s が0.051mmの直交格子を用いた。

図11には解析例として円孔の中心を通る最小断面に沿った引張方向ひずみの分布を示す。ひずみ分布の傾向は等方性材料の場合に類似しているが、試験片がわずかに非対称に製作されているため、この分布も完全に対称になっていない。また荷重の低い(5.88KN)ところでは孔縁におけるひずみ集中率

$$\alpha = \epsilon_{\max} / \epsilon_{\infty} \quad (4)$$

が約3.4で弾性材料の理論解析で得られた3.36⁽³⁾に近い値である。しかし、応力とひずみの関係が非線型であるために、荷重が高くなるにしたがい、例え

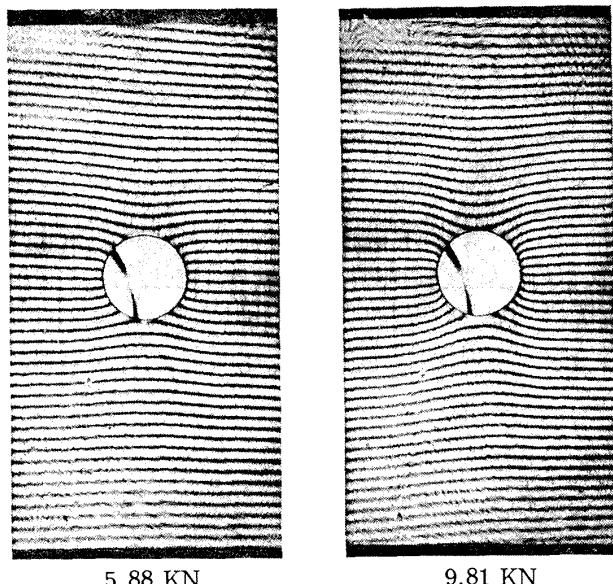


図10 ガラス繊維クロス複合材料有孔帶板の引張試験におけるモアレじまの例

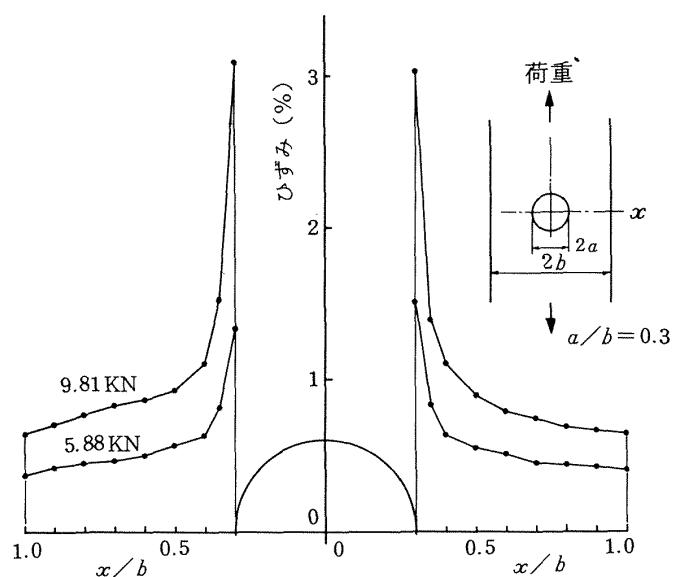


図11 ガラス繊維クロス複合材料有孔帶板のひずみ分布解析例

ば荷重が9.81KNの場合には約4.5となり、 α の値は大きくなる傾向がある。なお、式(4)で ϵ_{\max} は孔縁における最大ひずみ、 ϵ_{∞} は遠方における一様ひずみ分布になっているところのひずみを示す。

4.2 炭素繊維とエポキシ樹脂の複合材料

ここでは、炭素繊維一方向材料及び 0° , $\pm 45^\circ$, 90° 方向の繊維で構成された多層積層材料の有孔帶板が引張を受けた場合のひずみ分布解析を行った。これらの材料はいずれも繊維含有率が60%前後のもので、短冊試験片の引張試験で得られた強度特性並びに比重を表1に示す。

表1 炭素繊維強化複合材料の短冊形試験片により得られた引張強度特性

特 性 料	炭素繊維強化複合材料	
	一方向材料	多層積層材料*
引張強度(GPa)	1.06以上	0.47以上
弾性率(GPa)	137.3~142.2	47.1~48.1
比 重	1.60	1.60

* 繊維方向 0° , $\pm 45^\circ$, 90°

4.2.1 格子の印刷と試験法

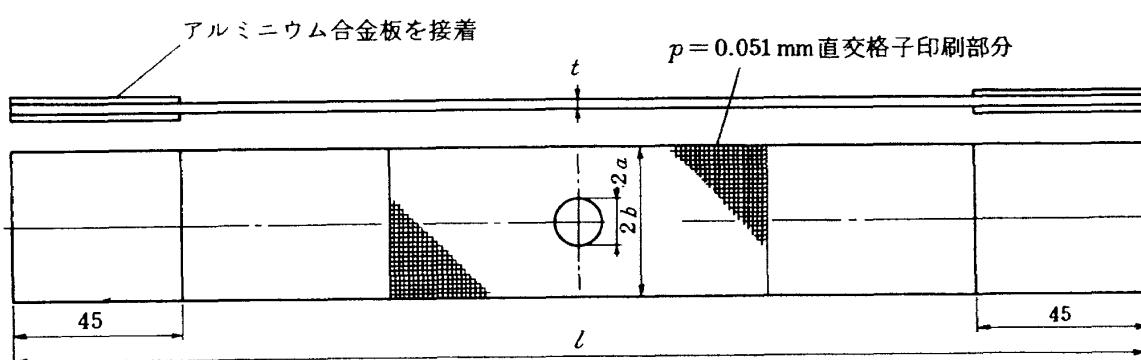
いずれの材料も表面は平滑でなく格子の印刷には適していない。しかも黒色であるため一般のフォトレジスト格子では格子線のコントラストもつかない。このため、まず試験片表面を銀色のラッカにて塗装し、この上に、先のガラス繊維クロス強化複合材料の場合と同様に、エポキシ樹脂をコーティングして平滑面を作り格子を印刷した。なお、ここで扱っている材料は前のガラス繊維のものよりもさらに剛性が高いので、このコーティングによる補強効果は無視してもさしつかえない。図12には実際に行った一方向材料及び多層積層材料有孔帯板試験片の形状寸法を示す。また、この試験片に対する格子の撮影、しま模様の観察、電気抵抗ひずみ計による測定などは先の等方性材料、ガラス繊維の材料の場合と全く同じである。さらに、一方向材料に対してはガラス繊維の材料と同じ 10 ton 万能試験機を使用したが、多層積層材料に対しては容量 100 ton の万能試験機（島津製作所；REH-100 型）により試験を行った。

4.2.2 試験結果と検討

図13には板厚約 3 mm, a/b が 0.3 の一方向材料有孔帯板の引張試験によるしま模様の例を、また図14にはこの場合の最小断面に沿う引張方向ひずみ分布の解析結果を示す。この例に対するモアレのしま模様も p_s が 0.051 mm の直交格子によるものである。

これらの結果から、円孔などの切欠きのある一方方向材料の強度特性に関する以下のようなことがわかった。まず、図13のしま模様より、繊維方向の引張荷重がある大きさ以上になると円孔の縦方向接線に沿ったき裂が入っているのがわかる。これは円孔などの切欠きがあるために、この接線に沿ったせん断による破損を生じてしまうことを示している。一般に一方方向材料の繊維方向引張強度は非常に高いが、切欠きが存在すると材料の強度がせん断強度に支配されてしまい、優れた引張強度特性を生かすことができなくなるのがこのしま模様から明らかになった。また、図14のひずみ分布解析結果には前述のき裂が現われる前と後でこの分布状態の変るものが示されている。すなわち、き裂発生前（荷重が 19.61 KN の場合）は孔縁のごく近傍でひずみ集中のある分布をしているが、後（荷重が 39.23 KN 及び 58.84 KN の場合）ではこのひずみ集中部が消えてしまい、試験片の両側で荷重を受け持ち、孔を含んだ部分は滑ってほとんど荷重を受け持たない状態になっている。

一方、図15及び図16には板厚約 3 mm, a/b が 0.25 の多層積層材料有孔帯板の引張試験におけるしま模様及び最小断面に沿った引張方向ひずみ分布の解析結果を示してある。この材料は、前に示したように一方方向材料が切欠きを持つような構造部材として用いる場合に問題があるのに対して開発されたも



寸 法	一 方 向 材 料	多 層 積 層 材 料
l mm	300.0	300.0
t mm	2.7	3.2
$2a$ mm	12.32	9.98
$2b$ mm	40.02	40.48
a/b	0.31	0.25

図12 炭素繊維強化複合材料有孔帯板試験片

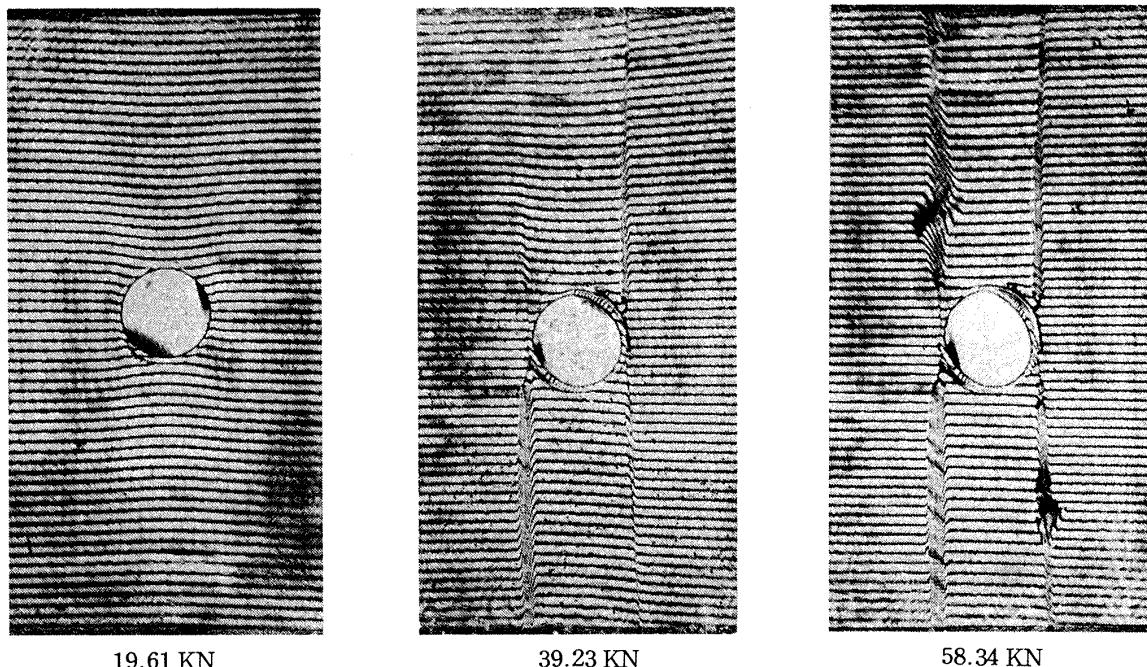
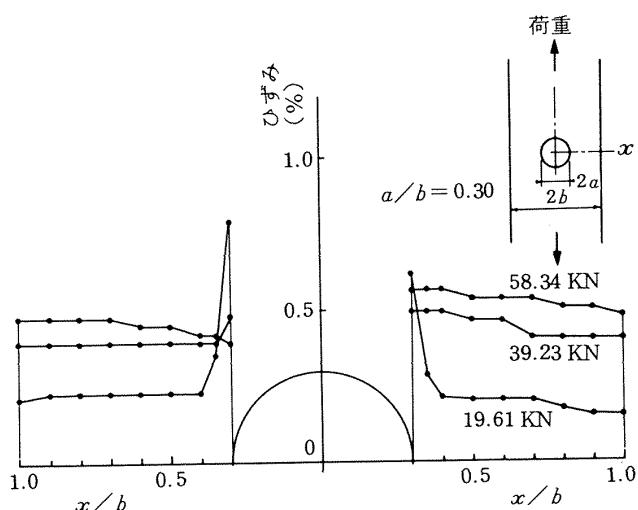
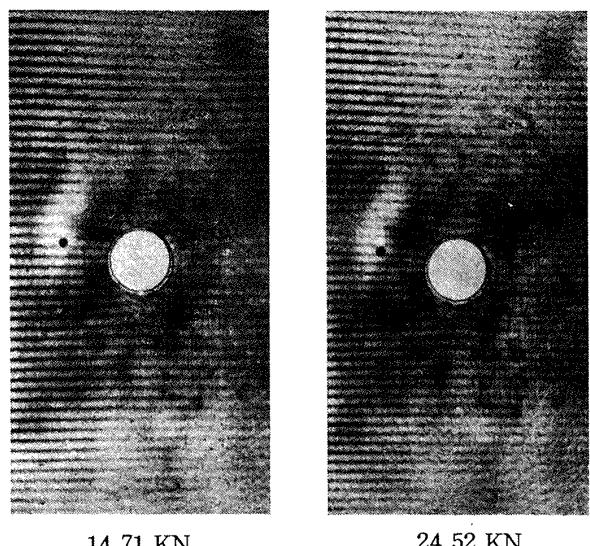


図13 炭素繊維一方向材料有孔帯板の引張試験におけるモアレじまの例

図14 炭素繊維一方向材料有孔帯板
のひずみ分布解析例

ので、引張方向に対し 0° , $\pm 45^\circ$, 90° の方向の繊維で強化された複合材料である。なお、この例も p_s が 0.051mm の直交格子によるしま模様を観察、記録しているが、図15のしま模様は前に示した材料の場合よりも不鮮明になっている。これはすでに述べたように、この材料の試験では大型の試験機を使用したので、格子線撮影の際にこの試験機のクロスヘッドの影が入ってしまったためである。したがって、しま模様は他の材料の場合と全く同じ性質のものであるので、ひずみは同じように求められる。

図15 炭素繊維多層積層材料有孔帯板
の引張試験におけるモアレじまの例

また、図15及び図16より、前の一方向材料に対しこの多層積層材料では切れ目があってもせん断による破損は生じないで、最小断面に沿った破断をするまでひずみ分布の状態は変化しないことがわかった。しかし、このひずみ分布の状態は前の図4(a)あるいは(b)で示されている等方性材料で得られたひずみ分布とかなり違っている。多層積層材料では繊維方向の組合せによりひずみ分布の傾向が変化し、孔縁の応力集中率は等方性弾性体の場合よりも大きくなる

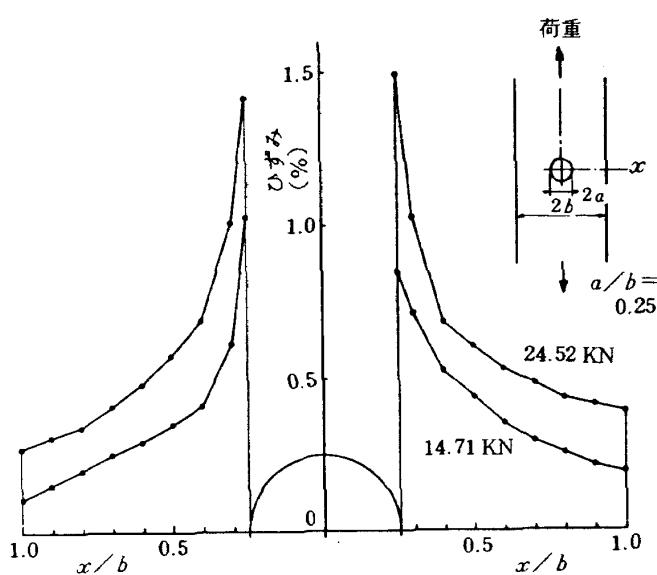


図16 炭素繊維多層積層材料有孔帯板のひずみ分布解析例

ことがすでに指摘されていたが⁽⁴⁾、ここでの結果もこのことを明らかにしている。すなわち、この試験片の孔縁でのひずみ集中率 α は約4.0。この材料では応力ひずみ関係がほぼ線型であるのでこの値は応力集中率におき換えられるが、等方性弾性体の理論解析で得られた値3.23⁽³⁾に比べてかなり大きくなっている。

なお、ここで扱った一方方向材料、多層積層材料とともに同じ繊維及び樹脂を用いたものである。また、先の表1に示してあるように、多層積層材料は引張強度、剛性(弾性率)とも一方方向材料よりもかなり低くなっている。しかしこの多層積層材料でも、現在航空機構造用として用いられている高力アルミニウム合金と比較した場合、比強度の面で優れており、構造の軽量化には有効である。

4.3 炭素繊維クロスとエポキシ樹脂の複合材料

この材料はハニカムサンドイッチの表面、桁構造のウェブなどに使われている朱子織の炭素繊維クロスとエポキシ樹脂による複合材料で、とくにここで扱ったのは一層のクロス強化材料である。朱子織一層のクロス材料は薄板に成形する際に含浸された樹脂の硬化過程で上下面に温度差が生じ、浅い曲面状の板になってしまい縦繊維(L)方向と横繊維(T)方向で残留ひずみによる強度的な差が生じる可能性があった。このため、L、T両方向の繊維に平行な試

験片を製作した。しかしながら、短冊形試験片による引張試験の結果この差があまりないことがわかり、いづれの方向の場合にも応力ひずみ関係は後に示す図18のようになり、また弾性率及び引張強度は表2に示した値であった⁽⁵⁾。

4.3.1 格子の印刷と試験法

この材料も表面状態及び色彩が高密度なフォトロジスト格子を印刷するには適していないかった。そこで、前に述べた炭素繊維強化材料の場合と同様に、表面を塗装しその上にエポキシ樹脂をコーティングして格子を印刷する手法を用いた。しかし、本材料はかなり薄いため、このコーティングによる補強効果を無視することができなかった。したがって、後で述べるようにモアレじまと電気抵抗ひずみ計を併用する方法により得られたひずみの値に対しては補強効果による修正を行って真のひずみを求める必要があった。

また、この材料に対しては両側に半円切欠きを持つL、T方向の図17のような形状の帯板試験片の引張試験によるひずみ分布解析を行った。試験には容量10 tonの万能試験機(インストロン；1125型)を

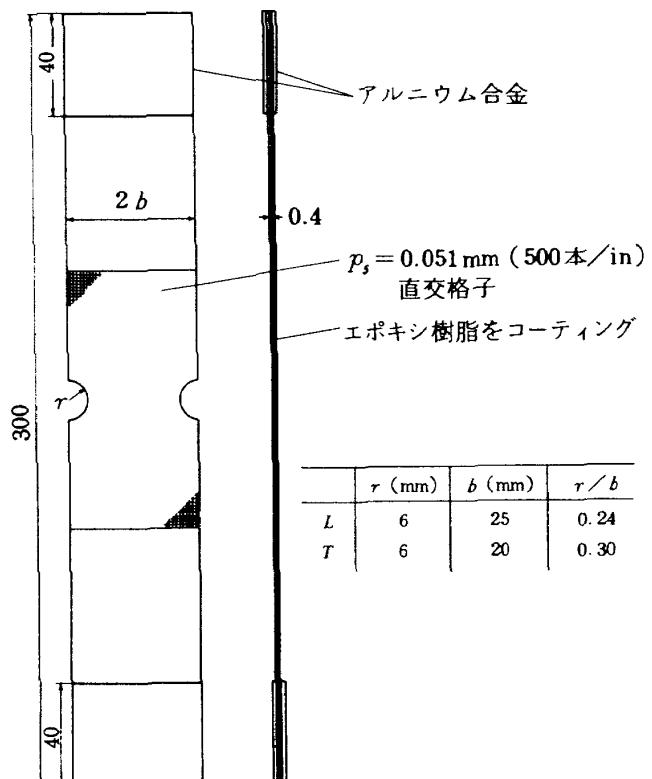


図17 炭素繊維クロス強化複合材料の切欠きを持つ帯板試験片

用いたが、とくにこの試験片ではチャック部分で破損を生じる可能性が高かったので、試験片のつかみ部分に厚さ 1 mm のアルミニウム合金を注意深く接着してここでの破損を防いだ。その他、この試験に対しても 2. で述べた方法で格子の撮影及びしま模様の観察を行い電気抵抗ひずみ計の測定も前の各材料の場合と同じゲージを用いた同じ測定方法で行った。

4.3.2 樹脂のコーティングによる補強効果

ここで扱っている複合材料と格子を印刷するため表面にコーティングした樹脂の短冊形引張試験片で得られた特性を表 2 に示す。材料が薄いため、表で示されているように剛性はかなり低いが、この樹脂をコーティングすると補強効果が生じてしまう。図 18 は樹脂がコーティングされた材料とされていない材料の短冊形試験片により得られた応力ひずみ線図である。この図で明らかなように、コーティングされた材料はかなり強くなってしまっており、補強効果が無視できないことを示している。そこで、まずこの補強効果の修正係数を光弾性被膜法の場合に Zandman らが導出した方法⁽⁶⁾で推定した。その結果、金属材料の弾性域では有効な方法であるが、この複合材料には適用できないことがわかった。このため、ここでは図 18 の応力ひずみ線図を利用して補強効果の修正係数を求めた。

すなわち、樹脂がコーティングされた材料で得られたひずみとこれに対応したコーティングされていない材料のひずみとの関係が次式のようになるとす

$$\varepsilon_i = C \varepsilon_{is} \quad (5)$$

ここで ε_{is} はコーティングされた材料で得られた

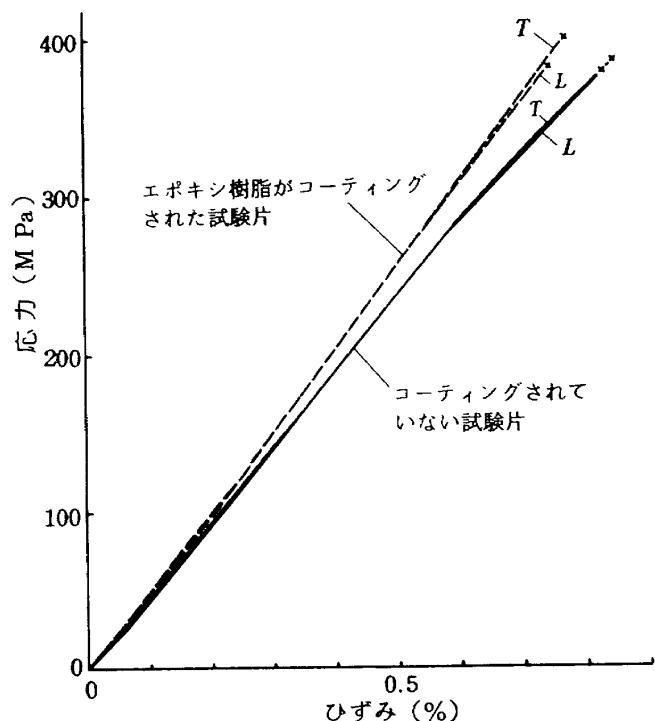


図 18 炭素繊維クロス複合材料の応力ひずみ線図

i 方向垂直ひずみ成分、 C は補強効果に関する修正係数である。

この C の値は一般に 1 よりも大きくなり、図 18 における ε_{is} の値とこれに対応する ε_i から求めることができる。図 19 は L 及び T 方向試験片の C と ε_{is} の関係を示す曲線である。樹脂がコーティングされた複雑な形の試験片からひずみ分布を解析する場合、ここで行っている方法で得られた各点のひずみ ε_{is} は補強効果のため低い値となっているが、図 19 の C を使うことによって真のひずみを推定することができる。また、この図には下地材料とコーティング材料の弾性率、ポアソン比及び厚さで決定される Zandman らの方法による修正係数も示してあるが、引張

表 2 炭素繊維クロス強化複合材料とコーティング用エポキシ樹脂の特性

特性 材 料	炭素繊維クロス強化複合材料*	コーティング用エポキシ樹脂** (Epicote 828, LP-3)
弾性率 (GPa)	42 ~ 46	1.1 ~ 1.6
ポアソン比	0.31 ~ 0.32	0.33 ~ 0.38

* 電気抵抗ひずみ計による測定値

** モアレ法による測定値

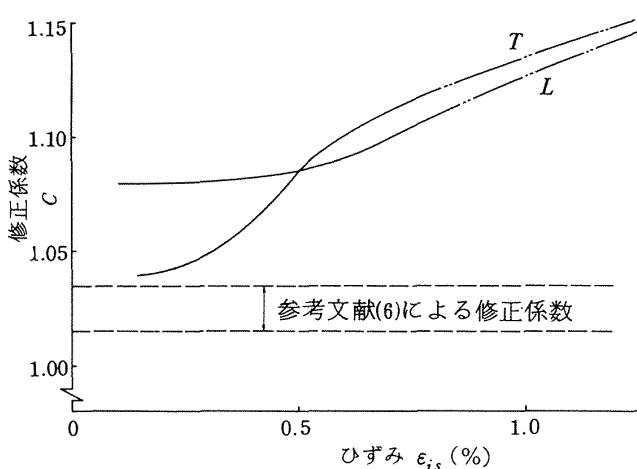


図19 補強効果の修正係数

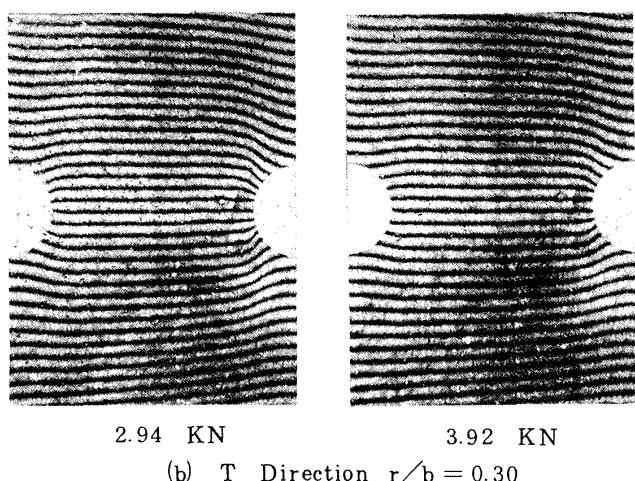
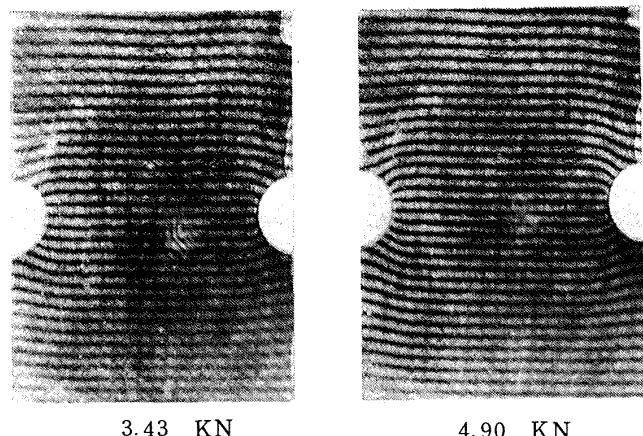
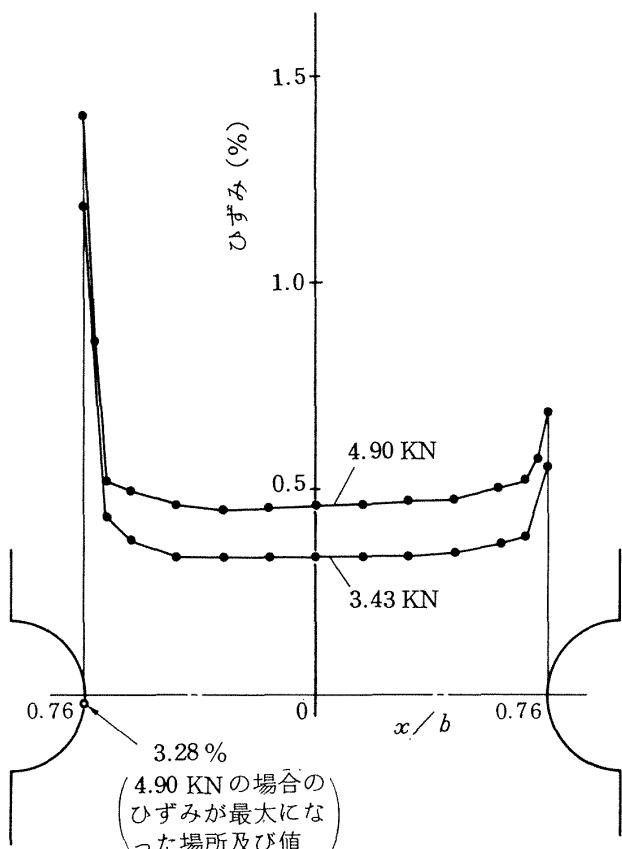


図20 炭素繊維クロス複合材料の切欠きを持つ帯板の引張試験におけるモアレじまの例

図21(a) 炭素繊維クロス複合材料の切欠きを持つ帯板のひずみ分布解析例
($L, r/b = 0.24$)

試験の結果から求めたものとは大部違っていることがわかる。

4.3.3 試験結果と検討

先の図 17 で示した形状で板厚 0.4 mm, L 方向, r/b (切欠き半径 r と帯板の幅に関係した値 b の比) が 0.24 及び T 方向, r/b が 0.30 の試験片に対して引張試験を行った。

図 20 にはこの引張試験で得られたモアレじまの例を示す。この図の(a)は L 方向, r/b が 0.24, (b) は T 方向, r/b が 0.30 の場合で、いずれのしま模様も p_s が 0.051 mm の直交格子を用いており、しま再生装置 1 次回折光による引張方向変位に関係したものである。さらに、このしま模様と試験片裏面にはられたひずみゲージで測定された値から、切欠き底を結んだ最小断面における引張方向ひずみ分布を求めて図 21 に示した。

これらのしま模様及びひずみ分布の解析結果からまず次のようなことがわかった。各試験片とも切欠き付近でひずみが増大する分布になっているが、こ

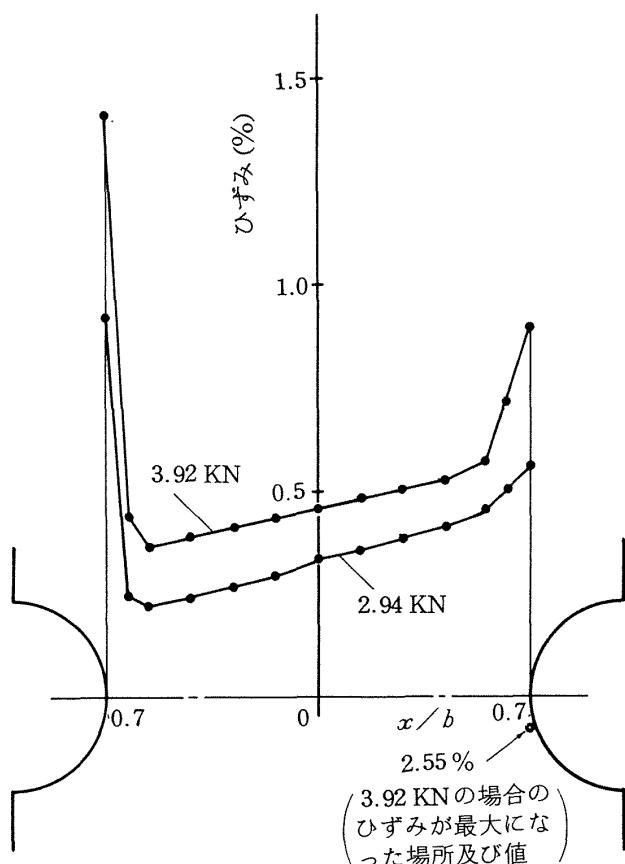


図21(b) 炭素繊維クロス複合材料の切欠きを持つ
帯板のひずみ分布解析例
(T, $r/b = 0.30$)

の様子は縦軸に対称でなく、両側の切欠き底におけるひずみの値もかなり違っている。これは試験片が十分な精度で対称に製作されていないこと、荷重が傾いてかかっていることなどにもよるが、それ以外に後で検討するように材料を拡大して見た場合に切欠き底で繊維状態が同じにならないことも大きな原因であると思われる。また、各試験片とも、金属などの等方性均一材料の場合と異なり、切欠きの影響がこのごく近傍だけにしか及ばないようなひずみ分布になっている。さらに切欠き底でひずみの値が最大にならず、縁上のこれより少し離れたところで最大になる。しかもこの最大値は先の図21に示したように切欠き底での値よりも著しく大きくなっている。

図22にはこれらのことを見たため、T方向, r/b が0.30の試験片を例にとり、これと同じ形状のアルミニウム合金及び室温では剛性の高いエポキシ系樹脂試験片の切欠き近傍のしま模様を比較して示した。この図より、ここで取り上げた複合材料のしま模様はアルミニウム合金あるいはエポキシ樹脂の場合と異った傾向を示しているのがわかる。

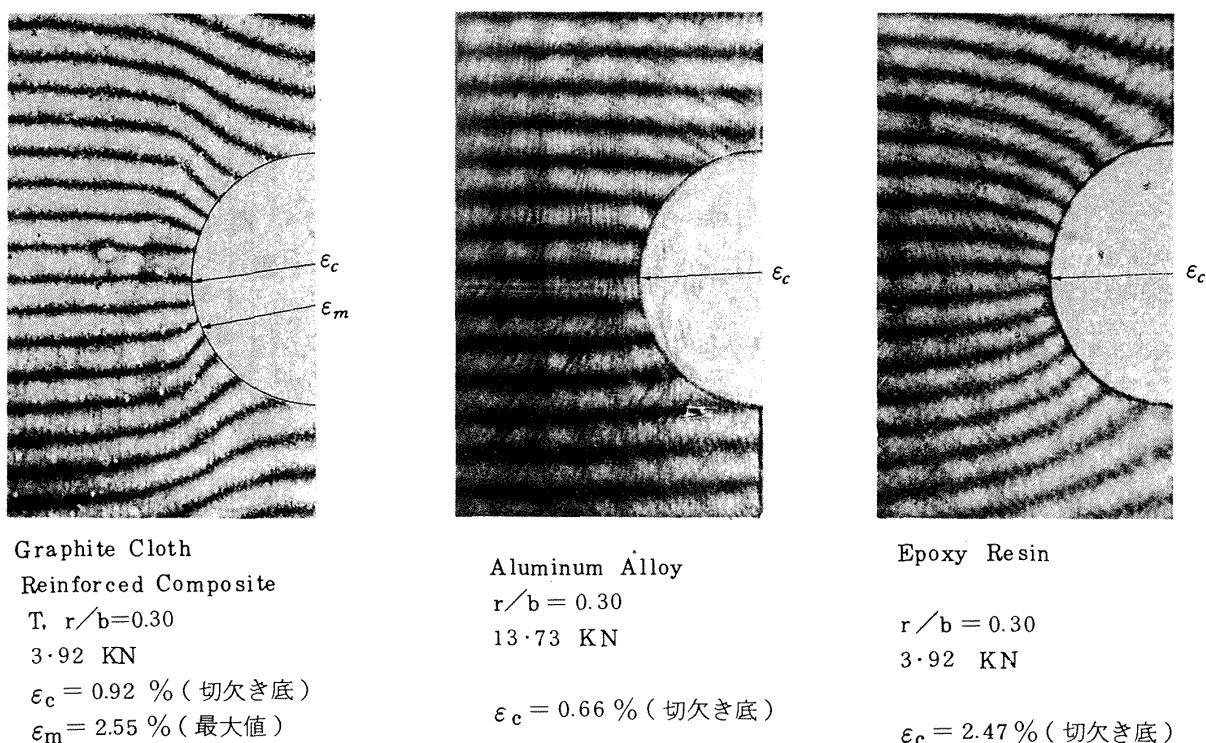


図22 切欠き近傍におけるモアレじまの比較

すなわち、このしま模様は引張ひずみの増加に対して、この方向のしま間隔が小さくなるような線型ミスマッチが与えられたものである。したがって、例えばエポキシ樹脂のしま模様を見ると、切欠きに近くに従いこの間隔が小さくなる模様になっている。また、しま間隔は切欠き底で最も小さくなり、ここでひずみが最大になることを示している。一方、この複合材料の場合は切欠き底ではありませんしま間隔が小さくならず、これより少し離れた縁のところで最小になり、ここでひずみが最大となることを示している。また、この材料では切欠きに近い部分のところだけで間隔が小さくなるしま模様となり、切欠きの影響を受けるのはこの部分だけであることを示している。図23はこの試験片の破断後の状態を示したものであるが、破断は切欠き底ではなくこのひずみが最大になったところで生じているのがわかる。今回の試験はいずれの試験片もこの縁の最大ひずみが 2.6 から 3.3 % になったところで破断している。しかし同じ材料の短冊形試験片の引張試験では破断時のひずみが 0.8 % 前後で、上述の値はこれよりかな

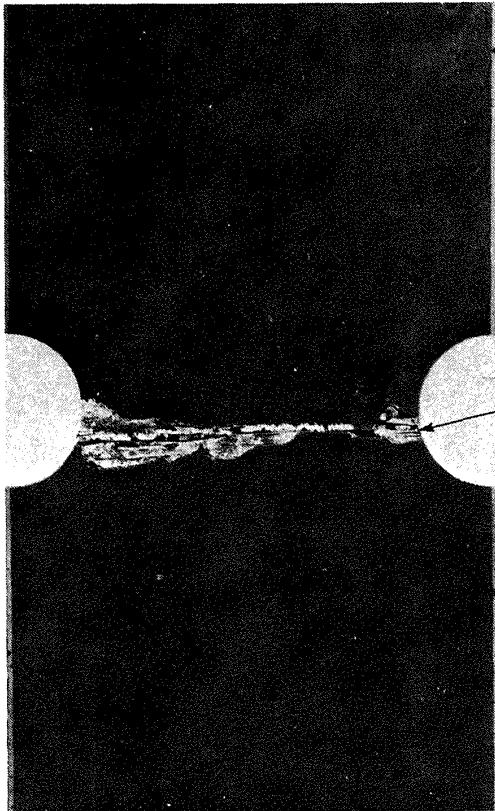


図23 炭素繊維クロス複合材料の切欠きを持つ
帯板試験片破断状態 ($T_r/b = 0.30$)

り大きくなっている。これは切欠きの影響がこのごく近傍だけにしか及ばないために生じた現象であると思われる。

一方、以上で述べたような本複合材料の切欠き強度の特徴に対する理由は朱子織クロスの繊維状態を示す図24によって推定することができる。すなわち、このクロスは2000本の繊維を束にしたロービングを図24(a)のような状態に織ったものである。これが点線で示したような半円切欠きを持つ試験片に作られているが、引張荷重を受けると縦方向のおののおののロービングの境界で滑りが生じ、切欠きから離れたところでは変形が切欠きの影響をほとんど受けない状態となる。また、この試験片の切欠き底付近のロービングをさらに拡大すると、一般にこの図の(b)のようになっていると考えられる。この切欠き底では繊維が連続しているが、少し離れたところでは切断されているので荷重がかかるとこちらの方が大きく

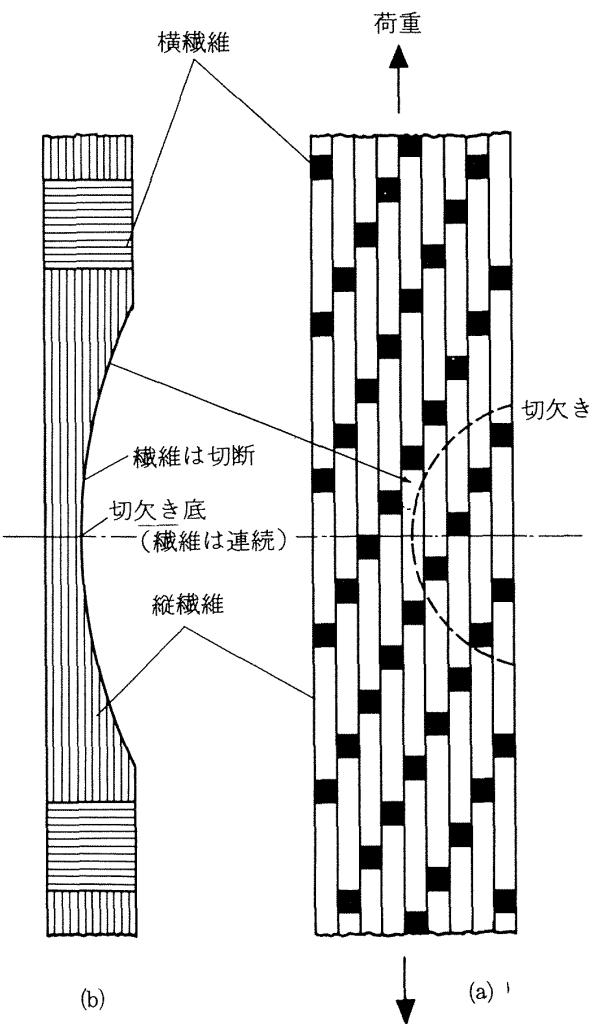


図24 朱子織クロスの繊維状態

変形する。また両側に同一形状の切欠きがある試験片でもこのように拡大して見た場合、切欠き底近傍のローピングの切断されている繊維の数は一般に左右で違っているはずであるから、変形の大きさも異なってくる。このようなことから、ここで扱った複合材料では先の試験結果のような現象が生じたものと考えられる。

4.4 ガラスチョップマットとポリエスチル樹脂の複合材料

複合材料のひずみ分布解析例としてここまでに取り扱ったものは、室温下での電気抵抗ひずみ計の適用にはとくに問題のない場合であった。しかし、マトリックスとして用いられている樹脂の種類あるいは材料の厚さなどによってはこのひずみ計の適用が困難な場合がある。このような材料の例として、ガラス繊維のチョップマットとポリエスチル樹脂による複合材料のひずみ解析を行った。とくにここでは、弹性率 4.75 GPa, 引張強度 43.3 MPa, 破断ひずみ 1.2 % 程度の特性を持つ薄い材料を取り上げた。

4.4.1 格子の印刷と試験法

この材料は繊維含有率が低く(30~40%)平滑な表面をしているため、このまま普通に行われている方法でフォトレジスト格子が印刷できる。しかし、ポリエスチル樹脂の場合は印刷後の格子線のコントラストがあまりよくない。このため、すでに述べたような試験片格子の撮影法を適用したが、光源の位置、被写体背後の条件などを考慮し、写真フィルム上にできるだけコントラストの高い格子線像が得られるようにした。さらに、しま模様のコントラストはしま再生装置によっても改良される。このようなことから、ここではかなり良好なしま模様を観察することができた。

一方、しま再生装置で求めたしま模様からひずみを解析する場合、変形前と面内変形のみによる変形後のしまを観察しなければならない。しかし、負荷などにより変形前後のしま模様の変化には面外移動の影響が含まれてしまい、とくに面内変形が小さい場合にはこれによる誤差が相対的に大きくなるため、先に電気抵抗ひずみ計を併用して変形後のしま模様のみからひずみ分布を解析する方法を提案した。しかし、ここで扱う材料は電気抵抗ひずみ計による測

定に問題があった。そこで、前の2.で述べたいくつかの試験片を組合せ、これらが絶えず同一面上にあってその内の一つだけが負荷により変形を受けるようにし、変形前後のしま模様を同時に観察できる試験法を適用した。

図25には上述の方法による引張試験用試験片の形状を示す。これは同じ材料で全く同じ格子が印刷された二つの試験片、すなわち負荷される試験片とされない試験片(基準試験片)により構成されている。これらの試験片は金属の治具に接着あるいはボルトで締結されて相対的な面外移動を拘束し、負荷される試験片だけが面内に動ける状態にしておく。したがって、負荷されてもこの二つの試験片は同一面内にあり、これを写真撮影したフィルムをしま再生装置に入れれば変形前後のしま模様が同時に観察でき、

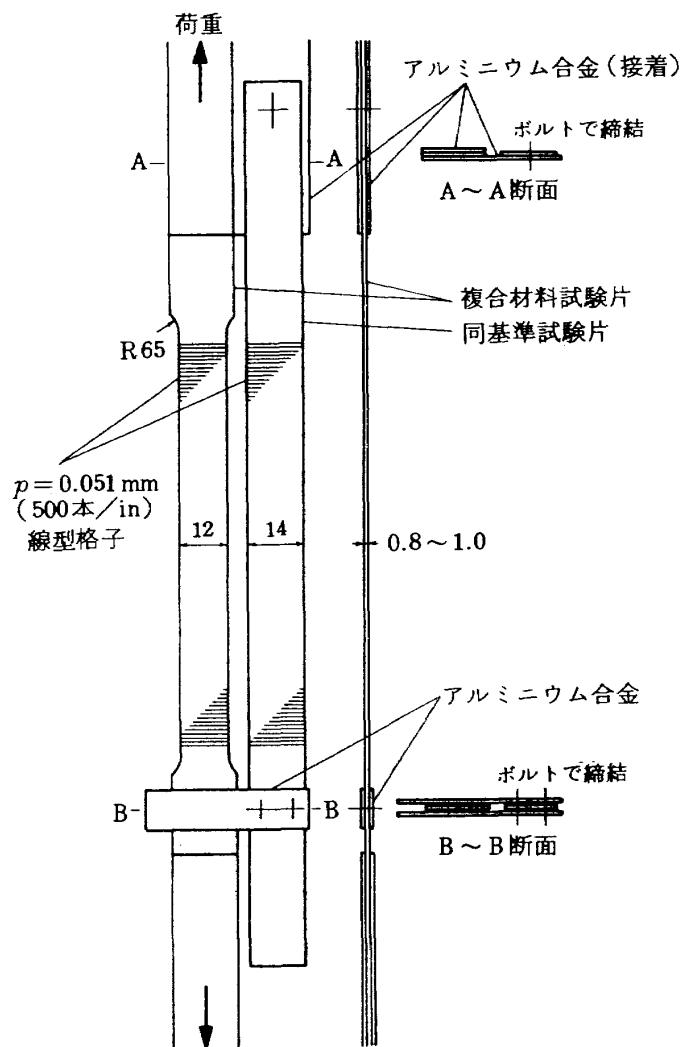


図25 ガラスマットポリエスチル樹脂複合材料の引張試験片

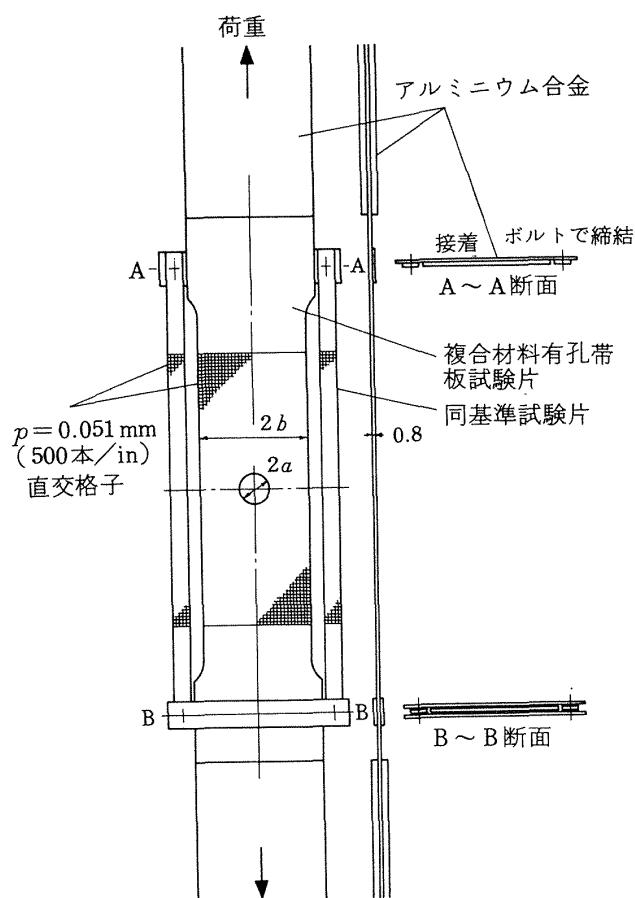


図26 ガラスマットポリエスチル樹脂複合材料の有孔帯板試験片

このしま模様の差は面内変形のみに關係したものになる。また、図26には有孔帯板に対する試験片の形状を示す。この場合も両側の基準試験片と中央の有孔帯板試験片は同一の格子が印刷され、接着及びボルトで治具に固定して相対的な面外移動が拘束されているので、変形前後のしまを同時に観察することができる。

4.4.2 試験結果と検討

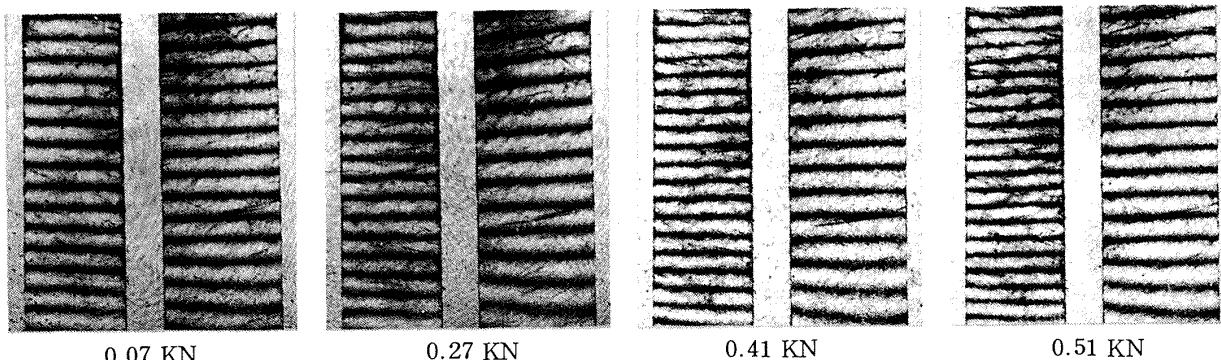


図27 ガラスマットポリエスチル樹脂複合材料の引張試験におけるモアレじまの例

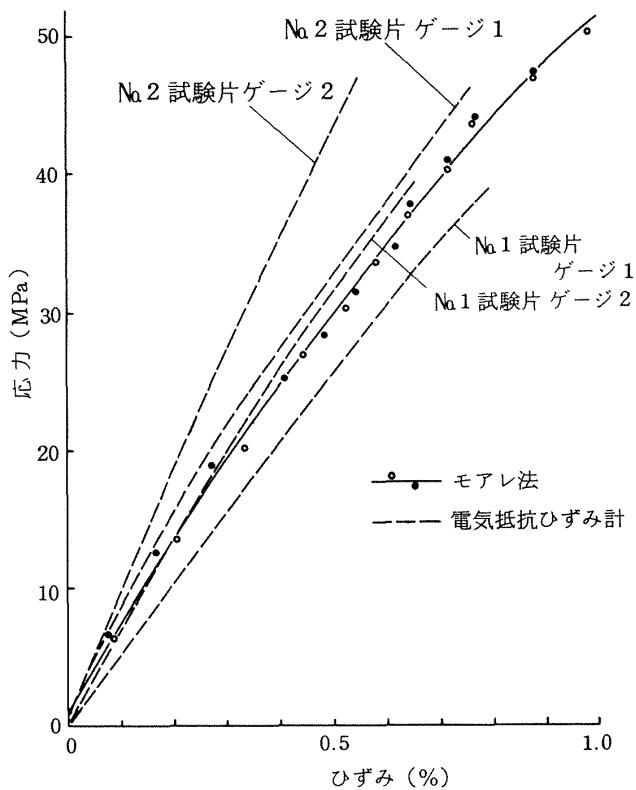


図28 ガラスマットポリエスチル樹脂複合材料の応力ひずみ線図

図27には先の図25で示した板厚 0.8 mm の試験片の引張試験で得られたモアレじまの例を示す。この場合には引張方向に垂直な方向で p_s が 0.051 mm の線型格子を用いた。また、各荷重点の右側は変形しない試験片、左側は変形した試験片によるしま模様を示しており、これらの間隔を測定してひずみが求められる。図28はこの引張試験で得られた応力ひずみ線図である。なお、この図には電気抵抗ひずみ計により得られたものも比較してある。電気抵抗ひずみ計による測定は先に示した各材料と同じひずみゲージ、測定器、測定方法を用いている。また各試験

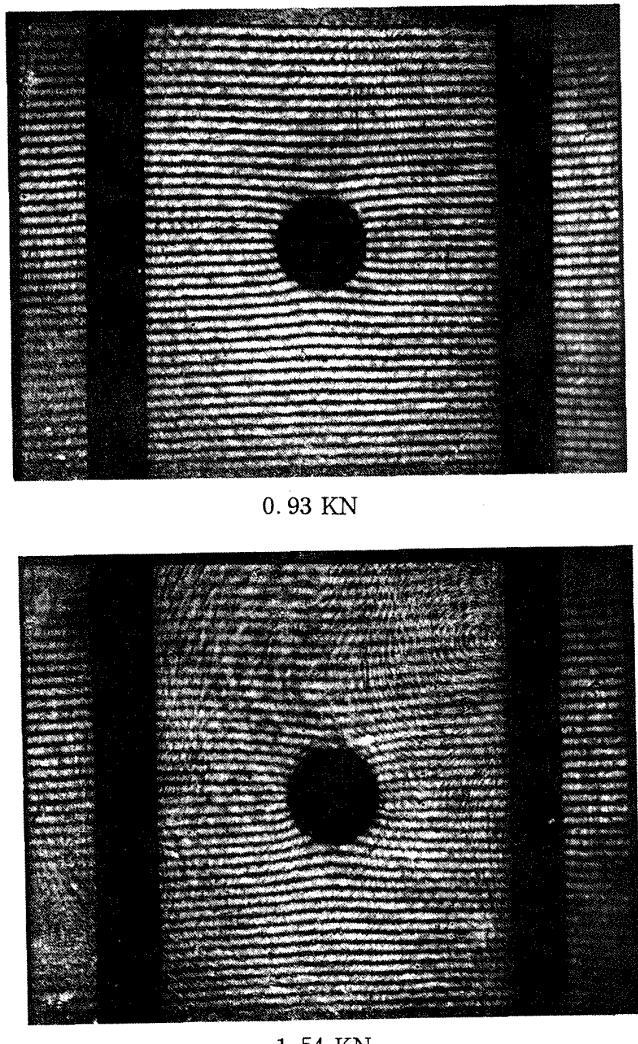


図29 ガラスマットポリエスチル樹脂複合材料有孔帶板の引張試験におけるモアレじまの例

片には同一面（格子が印刷されていない面）に2枚のゲージをはり、この二つの値を比較した。その結果、図に示されているように各ゲージによって測定値は全く異なった傾向を示し、電気抵抗ひずみ計の適用には問題があることが明らかになった。

図29は有孔帶板の引張試験により得られたしま模様の例である。これは先の図26で示された形状で板厚0.8mm, a/b が0.25の試験片によるものである。この場合も p_s が 0.051mm の直交格子を使用し、引張方向変位に関係したしまである。また、この図の両側のしま模様は変形を受けない基準試験片により得られたもので、これと中央の有孔帶板試験片で得られたしまから各点のひずみが求められる。図30はこの試験片の最小断面に沿った引張方向ひずみ分布の解析結果である。

この結果から、本材料はガラスの短い繊維が任意

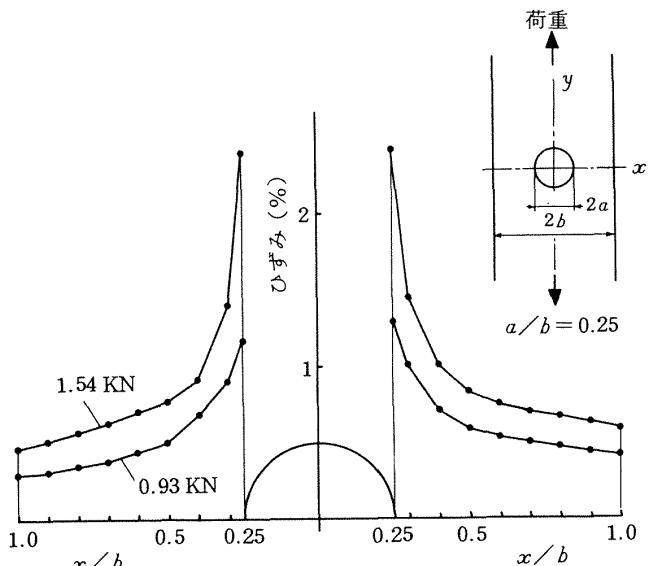


図30 ガラスマットポリエスチル樹脂複合材料有孔帶板のひずみ分布解析例

方向に入っているものであるため、荷重の低いところ（0.93 KN）では等方性材料と同じようなひずみ分布となり、孔縁のひずみ集中 α は約3.4で等方性弾性体に対する理論解の3.23⁽³⁾に近い値となっている。しかし、応力ひずみの関係が多少非線型であるため荷重が高くなるにしたがい α は大きくなり、例えば 1.54 KN のところでは約4.3となっている。

なお、先の電気抵抗ひずみ計を併用した方法と比較して、ここで行った方法では試験片の状態が複雑になるが、先の方法と同様に負荷などによる面外変位があってもひずみが求められ、さらに温度変化があるような場合にも適用が可能である。しかしながら、この方法は基準試験片と試験片両方のしま模様を観察して、この差からひずみを求めている。したがって、測定感度は観察されるしま模様のミスマッチにも多少左右されるが、これを改良しても電気抵抗ひずみ計と比べればかなり低い。さらに、上述の2種類の模様おのおのに対しても間隔を測定しなければならず、このため測定点が多くなる。

5. 結 言

ここでは、まずしま再生装置を利用するモアレ法を基にした、とくに剛性の高い平板状の複合材料に対する二通りのひずみ分布の解析法、すなわち電気抵抗ひずみ計とモアレ法を併用したもの及び同一材

料のいくつかの試験片を組合せた試験法によるものについて述べ、さらに航空機などの構造部材として用いられている繊維強化複合材料への適用例について示した。

しかしながら、上で述べた二通りの方法の内前者、すなわち電気抵抗ひずみ計を併用する方法の場合はその実用性が検討されていなかった。そこで、複合材料への適用に先立ち、この方法によりアルミニウム合金及び剛性の高いエポキシ樹脂の有孔帯板の引張試験におけるひずみ分布を解析し、理論解析との比較を行った。その結果ピッチが 0.050 mm 程度の格子を用いた場合でも 0.1 ~ 3.0 % の範囲のひずみを精度よく求めることが可能で、剛性が高い繊維強化複合材料のひずみ分布解析には有効な方法であることがわかった。

また、実際の適用例としていろいろな繊維強化複合材料の中央に円孔あるいは両側に半円切欠きを持つ帯板の引張試験によるひずみ分布の解析を行ったが、このような複合材料は繊維や樹脂の種類、繊維の状態などにより強度特性のみならず、材料の表面、色彩などの外見もかなり異なっている。したがって、モアレ法を適用するに当っては、格子の印刷、しま模様の観察、あるいは先に述べたいずれの試験方法を用いるかなどその都度工夫し、検討する必要があった。そこで、まず各材料に対して行った手法について示した。さらに、これらの複合材料の切欠きを持つ帯板試験片に対して得られたしま模様及びひずみ分布解析結果から、円孔あるいは半円切欠きと強度の関係を検討したが、同じような形状の切欠きでも各材料の繊維の状態によりこの強度特性が著しく異なることが明らかになった。とくに炭素繊維の一向向強化材料では切欠きがあるとせん断による破損が生じて、優れた引張強度特性を生かすことができなくなる。同じく朱子織クロス強化材料では切欠きにより特異な強度特性を示すことがわかった。これに対しては朱子織クロスの繊維状態の模式図を用い

てこの原因の推定を行ったが、その結果この材料が上述のような特性を持つ理由を定性的に明らかにすることができた。

最後に、本研究を行うにあたり航空宇宙技術研究所機体第一部複合材料研究室古田敏康室長には複合材料に関するご教示願いかついく種類かの試験片用材料を提供していただいた。また、同所機体第二部薄一平技官にはひずみ分布の計算などにマイクロコンピュータを使用させていただき、さらに同部青木由雄、浜口泰正両技官には実験に協力していただいた。ここでこれら諸氏に感謝の意を表します。

6. 参考文献

- (1) 越出慎一：しま再生装置を利用したモアレ法によるひずみの解析、航空宇宙技術研究所報告、TR-513, (1977).
- (2) 越出慎一：高強度耐熱エポキシ樹脂の材料特性の測定、航空宇宙技術研究所資料、TM-390, (1979).
- (3) R. C. J. Howland : On the Stress in the Neighborhood of a Circular Hole in a Strip under Tension, Transactions of the Royal Society, Series A, Vol. 229, (1930), 49~86.
- (4) C. E. S. Ueng : Stress Concentration Factors Around a Circular Hole in Laminated Composites, NASA, CP-2001, (1976), 711~720.
- (5) 越出慎一：炭素繊維布強化複合材料のひずみ測定に関する検討、NDI 分科会資料 No. 4552, (1980), 1~7.
- (6) F. Zandman, S. S. Redner, E. I. Riegner : Reinforcing Effect of Birefringent Coating, Experimental Mechanics, Vol. 2, No. 2, (1962), 55~64.

航空宇宙技術研究所報告681号

昭和56年8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 株式会社共進
東京都杉並区久我山5-6-17

Printed in Japan