フェノールレジン積層板のせん断加工 (第3報)*

——圧痕領域内の応力とひずみの測定および1次割れの発生機構——

北 条 英 典**

Shearing of Paper Phenolic Laminates

——Reports 3. Studies on the stress and strain distribution in the parts compressed by the edges of punch and die, and on the character of the first micro cracks——

Hidetsune Hojo

Stress distribution at the stage of elastic deformation and strain distribution at the appearance of the first micro cracks in the parts compressed by the edges of punch and die were analyzed under several punching conditions, employing the technique of photoelasticity for the former and surface coating method of photoelasticity for the latter. Observing the fractures of the paper phenolic laminates which were uniaxially loaded, and comparing the angle of principal axes of the stress and strain to the angle of the first micro cracks, mechanism of appearance of the first micro cracks was clarified. The results obtained are as follows: (1) Stress distribution at the stage of the elastic deformation is similar to that at the stage of appearance of the first micro cracks, and stress distribution in the compressed parts near the edges of punch and die is clearly distinguished from the one in the other parts of the punched material. (2) In view of these stress distributions, it can be supposed that the thin layer including the edges of punch and die has a tendency to be extruded. (3) Stress distributions are scarcely affected on the holding conditions of the punched material, width of punch, clearance between punch and die, and width of the formed edges of the punch and die. (4) The paper phenolic laminates are fractured by tensile rupture accompanying slip fracture in the case of tensile test, and slip fracture occurred in the case of compressive test. (5) Inclination of the first micro cracks to the x axis coincides with that of principal shear stress or shear strain, and thus it is concluded that the first micro cracks are the brittle fractures owing to the slip of the punched material.

1. 緒 言

さきにフェノールレジン積層板のせん断過程は、弾性変形期から直ちに微細な割れを生じて1次割れ発生期になり、ついで2次割れ、切削期に移行することを明らかにした¹⁾。この1次割れの発生は該材料のせん断加工に特有な過程であつて、せん断機構の把握にはその発生機構を明確にしておく必要がある。本報では、圧痕領域内***の弾性変形期の応力ならびに1次割れ発生期の主ひずみを測定し、1次割れの発生機構について考察した

結果を報告する。

弾性変形期の応力は、材料を等方弾性体とみなせば、光弾性によつて解析できる。平面光弾性によるせん断加工の解析には、益田森治・神馬敬²⁾の両氏により等色線が、また箕浦貞・駒井徳三郎³⁾の両氏により、材料の板面に平行な圧縮力を加えた場合の等色線と主せん断応力線がそれぞれ提示されている。しかし応力成分やそれにおよぶせん断加工時の材料の拘束条件・クリヤランスなどの影響については明らかでなく、ここではそれらについても検討することにした。

1次割れ発生期のひずみの解析は、1次割れが材料に固有の特性をもつことから実物で行なうことが望ましく、光弾性皮膜法による実物光弾塑性を採用した。

* 本論文の大部分は昭和36年4月精機学会春季大会にて発表

** 電気通信研究所 正会員

*** 材料のポンチ側とダイス側の圧痕面で区切られる四角な領域

2. 弾性変形期の応力

2.1 実験装置

光弾性装置は偏光子直径 150mm の理研計器製を使用した。負荷装置は図 1(i) のような平行直刃せん断型であつて、両刃系と片刃系のおのおのについて、材料のすべての拘束条件、すなわち材料支持・材料固定・材料全固定¹⁾ が実験でき、さらにポンチとダイスが交換できる構造にした。負荷装置の構成各部分はすべて研削仕上げを行ない、ポンチ抑え金とダイス上面は同一平面に仕上げた。

2.2 実験条件と実験方法

(1) 実験条件

実験要因には、材料の拘束条件・クリアランス・ポンチ幅・圧痕幅をとり、その水準値は表 1 の通りである。表において、材料固定におけるダイス上材料抑えとポンチ側面のすきま δ は、 H を板厚として片刃の場合 $2 \cdot 6H/16$ 、両刃の場合 $5 \cdot 5H/16$ であり、材料全固定におけるポンチ下材料抑えとダイス側面のすきまは $H/16$ 以下、その抑え力は比せん断力* に換算して 0.245 kg/mm^2 である(図 1 参照)。ポンチ幅は、これが板厚の数倍以内のいわゆる小穴抜きになると、せん断過程に変化が生じること

(i) 負荷装置

(ii) 圧痕幅を限定した刃先の形状

図 1 光弾性負荷装置の概要

表 1 光弾性の実験条件と測定誤差

項 目		せん断形式 (材料の拘束条件)		打 抜 き								穴 抜 き	
		片 刃 系				両 刃 系				全 固 定		支 持	
		支 持				固 定				支 持		固 定	
実験条件	クリアランス (%)	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	6
	w/H	—	0.25	0.37	0.50	—	—	—	—	—	—	—	—
	ポンチ幅/ H	—	—	—	—	—	7.1	6.3	7.2	7.1	1.2	1.0	—
	$k \text{ (kg/mm}^2\text{)}$	0.95	0.93	0.94	0.93	0.86	0.85	0.79	0.86	—	0.98	0.85	—
測定誤差 (%)	$W \text{ (kg/mm)}$	11.5	11.2	11.4	11.2	11.8	10.9	11.4	10.8	—	11.0	11.0	—
	y 軸方向	⑧'				+8.7				-4.0			
		④'				+2.0				-2.9			
		④				-2.5 +5.3						+4.1	
測定誤差 (%)	x 軸方向	⑧				+1.4 -4.7						+7.7	
		⑧'-④'				+0.3				+5.5			
		④'-④				+2.1							
		④-⑧				-6.0 -2.0						-1.1	
第 1 せん断線の角度 (deg)		32.5	32.3	30.8	29	26.3	30.5	27	28	25	23.5	20.0	

を考慮し、板厚の 6.3~7.2 倍の場合と、1.0~1.2 倍のご

* 比せん断力 = 片刃当たりの荷重 / 試料断面積 (= 板厚 $H \times$ 光路方向の厚さ d)

く小さい場合とをとり、ここではそれぞれ打抜きおよび小穴抜きと呼ぶことにした。クリアランスは片側板厚百分率で 0% (0.01mm 以下) と 6%、ポンチとダイスの

刃先角は 90° にした。つぎに圧痕幅は工具刃先の正面で材料が強圧されて生じる面の幅であり、せん断現象の説明には重要な量である。これはせん断条件によつて、おのずから決まるが、片刃材料支持の場合について、図1(ii)のような材料と工具刃先正面の接触長さ w を限定した工具を別に使用し、 w の影響について検討することにした。

(2) 応力の解析方法

応力の解析は、図2のように刃先からの水平距離が

図2 座標軸と応力解析の対象断面

$H/16$ と $3.5H/16$ の y 軸方向の断面 A (ad), B (bc), A' (a'd'), B' (b'c') について、せん断応力差積分法⁴⁾によつて行なつた。すなわち座標軸を図のようにとれば、せん断応力 τ_{xy} (図の向きを正とする), x, y 軸方向の応力 σ_x, σ_y は

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= 1/2 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta = ns/2d \cdot \sin 2\theta \\ \sigma_x &= \sigma_{x0} - \int_{x0}^x \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx \\ \sigma_y &= \sigma_{y0} - \int_{y0}^y \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dy \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで主応力 σ_1, σ_2 のうち代数的に大きい方を σ_1 とし、 θ は σ_1 の x 軸となす角、 σ_{x0} と σ_{y0} は座標原点における σ_x と σ_y の値、 n は縞次数、 s はフリッジ応力、 d は試料の光路方向の厚さである。

n と θ はそれぞれ等色線と等傾線図より測定され、 d と s は試料の常数であるから、 y 軸に沿い式(1)を図式積分すれば σ_x, σ_y および τ_{xy} が求まる。また主応力は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= ns/d \\ \sigma_1 + \sigma_2 &= \sigma_x + \sigma_y \end{aligned} \right\} (2)$$

の関係より求めた。

(3) 実験方法

等色線と等傾線の測定に当たり、両者で光弾性感度の異なる試料をえらぶのが一般であるが、これは本実験の

ように、刃先における工具と材料の接触状態が問題になる場合には好ましくない。特に片刃材料支持のように材料の拘束が不完全な場合、接触状態が荷重や材料によつて変化するため、試料を変えた場合の等色線と等傾線図が必ずしも対応しないおそれがあるからである。そこで試料はポリエステル樹脂を用い、単色光($5461 \text{ \AA}$)の円偏光で等色線を撮影したのち、そのままの負荷状態で、直ちに白色光の平面偏光にきりかえ、等傾線をスクリーン上に投影して、 5° とびに測定した。

つぎに試験荷重の選定であるが、図3のように、比せ

図3 荷重による等色線と等傾線の変化

ん断力 k が約 0.5 kg/mm^2 以上になると、等色線の零次の縞位置、圧痕幅や等傾線の変化がかなり少なくなるので、 k は $0.8 \sim 1 \text{ kg/mm}^2$ 程度にした。

等色線と等傾線はそれぞれ左右の刃について測定し、 n と θ は両者の平均より求めた。なお荷重は、左右の刃に等分され、その等色線が一致するように留意し、片刃系せん断では、左右の刃に試料を置いて荷重のバランスをとつた。

試料は、光路方向の厚さ d が約 6.5 mm 、せん断方向の厚さ H が $8.5 \sim 14 \text{ mm}$ に研削仕上げしたのち、時間縁効果を考慮して直ちに実験に供するようにした。フリッジ応力と弾性率は四点曲げ試験で測定し*、それぞれ

* フリッジ応力 $S = 12M/H^2N$, M : 曲げモーメント (mm-kg), H : 試料の厚さ (mm), N : 縞数の総和

2.88 kg/mm と $3.66 \times 10^2 \text{ kg/mm}^2$, 初縁応力は最も大きい試料の場合に表層で0.2縞程度の圧縮応力が作用し, 材料内約 0.3mmで消失する程度であつた。

ポリエステル樹脂による等傾線の測定は, 図3からわかるように, 光弾性感度が高いため困難である。このため低感度のメタクリル樹脂による等傾線の測定結果を参照して正確を期した。

(4) 測定精度の検討

応力の測定精度は, x 軸および y 軸方向の力の釣合より検討した。すなわち図2において, y 軸方向では, 断面④(a d e' a'), ⑥(b c e' a'), ④' (a' d' e a), ⑥' (b' c' e a) に作用する y 軸方向の合力の測定値をそれぞれ W_A , W_B , $W_{A'}$, $W_{B'}$ とすれば, これらは試験荷重 W^* と釣合うべきである。そこで測定誤差は, たとえば断面④については

$$\text{誤差} = (W_A - W) / W \times 100\% \quad (3)$$

とした。ただし W_A は

$$W_A = \int_a^d \tau_{xy} dy + \int_d^{e'} \sigma_y dx + \int_{e'}^{a'} \tau_{xy} dy$$

であつて, 測定値を図式積分して求めた。断面⑥, ④', ⑥' についても同様である。

x 軸方向では, 矩形域⑥'—④' (a' b' c' d'), ④'—④ (d e d' e'), ④—⑥ (a b c d) に作用する x 軸方向の合力の測定値 $W_{B'-A'}$, $W_{A'-A}$, W_{A-B} は零になるべきであり, 便宜的にこれらと W の比の百分率を誤差とした。たとえば矩形域④—⑥では

$$\text{誤差} = \pm W_{A-B} / W \times 100\% \quad (4)$$

ただし W_{A-B} は

$$W_{A-B} = \int_a^b \tau_{xy} dx + \int_b^c \sigma_x dy + \int_c^d \tau_{xy} dx + \int_d^a \sigma_x dy$$

式(4)の符号は W_{A-B} が x 軸の正の向きにあるときを正, 逆の場合を負とした。他の矩形域 ④'—④, ⑥'—④' についても同様である。

2.3 実験結果と考察

(1) 等色線と等傾線図

表1の実験条件による等色線と等傾線図の記録例をそれぞれ図4の(a)と(b)に示した。等傾線図中の数字は, 主応力軸の y 軸となす角度 θ' である。図4(a)において, 等色線の形状は近似的に圧痕領域の内と外とで異質になる。その縞次数は, 応力が集中する刃先において最も高く, 刃先から遠ざかるほど低下するが, 零次の縞は材料が無拘束な片刃材料支持 (図4 (i), (ii)) や片刃材料固定のダイス下材料 (図4 (iii)), 両刃材料支持のダイス

上材料 (図4 (iv)) においては, 刃先から x 軸方向の距離が (0.5~0.8) H の y 軸上に生じている。両刃材料支持や両刃材料固定のポンチ下材料は, 圧痕領域から十分に離れたポンチ幅の中央では, 零次の縞が板厚のほぼ中央に x 軸方向に生じており, 曲げと x 軸方向の軸力が作用していることが知られる (図4 (iv) (a'))。小穴抜きポンチ下材料では, 相手刃先の影響が大きくなり, 最低次の縞はポンチ幅の中央に生じる (図4 (v))。材料固定のダイス上材料や材料全固定のように, 抑えによる拘束がある場合, 零次の縞は抑えの状態に影響されるが, 2次ないし3次の縞の形状には, 大きい変化がみられない (図4 (iii))。

図4(b)の等傾線図は, クリヤランス部分近傍においては, せん断条件によつてほとんど影響されない。

(2) 応力分布

図2の断面 A, A', B, B' における応力成分の解析例を図5に示した。縦軸は板厚 (y 軸) であつて, 図の上面がポンチ側, 下面がダイス側である。横軸は応力を無次元化して, 応力と比せん断力 k の比 σ_x/k , σ_y/k , τ_{xy}/k で示した。またこれらの式(3), (4)による測定誤差は表1の通りで, おおむね数パーセント以内である。

これらの応力分布におよぼせん断条件の影響は, 前掲の等色線と等傾線図から予測されるように非常に小さい。たとえば, 両刃材料支持のポンチ上材料で代表されるような, 材料が無拘束な場合の応力分布 (図5 (i) 断面 A', B') は, 相手刃先の拘束を受ける場合 (図5 (i) 断面 A, B) や抑えがある場合 (図5 (ii)), ポンチ幅が小さい場合 (図5 (iii)), クリヤランスが大きい場合 (図5 (iv)) および圧痕幅を限定した場合 (図5 (v)) などの応力分布と大差がない。これは対象断面をクリヤランス部分の近傍に限定していること, 抑えが材料の回転を完全に阻止するほど強固でなく, かつ, 試験荷重が, 材料に十分な変形を生じさせるほどには大きくないことなどの理由による。

図5において σ_y/k のは対象断面の全域にわたり圧縮である。その絶対値は断面 A と A' においては, 板の自由表面から $1/8H$ 程度中に入ると急増し, 板の中央で 1.5~2 になり, 圧痕面に近づくとき指数函数的に増加して圧痕面近傍ではおおむね4以上に達する。断面 B と B' では, 板の自由表面から圧痕面にむかつてほぼ直線的に増加し, 圧痕面近傍ではおおむね 1.5~2 程度である。

つぎに圧痕面上の σ_y/k 分布を推測するために, 図2の dc ($y=15H/16$) と d'c' ($y=H/16$) 上の σ_y/k を求め

* W = 片刃当たりの荷重/光路方向の厚さ d 。

図 4 等色線と等傾線図の記録例

図4 等色線と等傾線図の記録例

図5 応力の分布

図6 圧痕面近傍 σ_y/k の分布
 σ_y/k : ○ダイス上材料 △ポンチ下材料
 圧痕面の端の位置: ●ダイス上 ▲ポンチ下

た例が図6である。せん断条件のいかんにかかわらず、 σ_y/k の絶対値は刃先から圧痕面の境界に向かって指数函数的に減少し、かつ d'c' 上 (ポンチ側) と dc 上 (ダイス側) とではほとんど一致している。この傾向は応力の連続性を考慮すれば、圧痕面上でも大差がないと思われる。

σ_x/k は圧痕領域内に引張り域と圧縮域とを生じる。すなわち断面AとA'では、板の中央で0.5程度の引張

りに、また自由表面近傍と圧痕面近傍とは圧縮になる。断面BとB'もこの傾向は変わらないが、自由表面では引張りである。すなわち自由表面における σ_x/k の x 軸方向の変化は、刃先近傍で大きい圧縮応力になり、そ

の絶対値は刃先から遠ざかると急速に減じ、ついで引張り応力に転じる。この応力状態は、フェノールレジン積層板のせん断切り口に見られるせん断輪廓線に平行な表面割れと、刃先近傍の圧痕面¹⁾とに対応すると考えられる。また断面 A, A', B, B' についての $\int \sigma_x dy$ はおおむね圧縮力であり、 σ_x/k の絶対値は各断面で σ_y/k のそれよりも小さい。

τ_{xy}/k は各断面で、圧痕面の近傍を除いて負になる。すなわち y 軸方向の変化は、板の自由表面で零、表面より $H/16 \sim H/4$ 程度のところで負の最大値になり、以後圧痕面に近づくほどその絶対値が減少して、圧痕面近傍では正を経て負になる傾向が見られる。

圧痕表面上の τ_{xy} は該表面に作用する摩擦力であり、その分布を知ることがせん断現象の把握に重要であるが、金属のせん断加工でもまだ定説のない状況である。本実験の測定精度では、その的確な分布は求め得ないが圧痕面上の $\int \tau_{xy} dx$ は概ね負になると推定される。この結果は $\int \sigma_x dy$ が圧縮力と推定されることと相まって、加工初期の材料は、マクロ的にクリアランス部分から板面と平行な方向に圧出される傾向をもつと考えられる。

(3) 主 応 力

クリアランス部分近傍の主応力線図と主せん断応力線図に対しても、せん断条件の影響は本実験範囲内ではほとんどみられない。たとえば図 7(i) (ii) に両刃材料支持と小穴抜きの場合を示した。これらの図で実線が第 1

せん断線と主応力 σ_1 、点線が第 2 せん断線と主応力 σ_2 である。

大略、 σ_2 は板の板面に垂直、 σ_1 は平行になり、また圧痕面上にはせん断線で形成される三角形域を生じる。特に小穴抜きのポンチ下では、この三角形域は大きく材料の自由表面付近にまで達する。

第 1 せん断線のクリアランス中心、板厚中央における x 軸となす角を表 1 の最下欄に示した。その角度は片刃系と両刃系

図 8 主応力の分布
(実線：断面 A, A', 点線：断面 B, B)

せん断のいずれも、材料の拘束が増すほど、また工具の圧痕幅が大きいくほど、クリアランスの大きい方がそれぞれ小さくなる傾向がみられる。

つぎに両刃材料支持と小穴抜きの場合の主応力を図 8 に示した。 σ_2/k は断面の全域で圧縮になり、 σ_y/k に近い分布である。 σ_1/k は圧痕面の近傍で圧縮になるほかはおおむね引張りであつて、その絶対値は σ_2/k よりも小さい。

3. 1 次割れ発生期の主ひずみ

3.1 実験装置

光弾性皮膜法による実物光弾塑性解析は、試料の表面にこれよりも軟質な光弾性皮膜を接着し、下地試験材の表面ひずみを皮膜の光弾性により解析するもので、解析結果に材料の特性が導入できるという特色がある。

実験装置の概要を図 9 に示した。せん断試験型は、ボール入りダイセットに組込んだポンチ幅 60 mm の平行直線刃せん断型である。試料は板厚 10 mm の D-1* を幅 10 mm、長さ 120 mm に機械仕上げし、板厚に垂直な面 (E 面) に厚さ 2 mm の光弾性皮膜を接着したもので、板面に垂直な方向 (F 方向) からせん断した。被接

図 7 主せん断応力線図と主応力線図

* 以下材料の記号は精密機械、27 巻 12 号 (1961) 794 参照のこと。

図9 皮膜法実物光弾塑性実験装置の概要

着面はラッピング仕上げ後アルミニウムの真空蒸着を施し、偏光の反射効率を高めた。光弾性皮膜は、エポキシ系樹脂エポン 815、チオコール（軟化剤）、TTA（硬化剤）の混合重量比をそれぞれ 100 : 50 : 30 にした注型板を用いた。この材料は注型性が良好なため容易に薄板を得ることができ、また皮膜の接着剤としても使用した。光弾性装置は、偏光子の直径が 50 mm、反射角が 15° 以内の反射式である。材料試験機で負荷し、そのベッドに本装置を固定して、試料との相対位置を一定に保った。

3.2 実験条件と実験方法

(1) 主ひずみの解析方法

接着面における下地試験材のひずみと皮膜のひずみは一致し、皮膜面内の主ひずみ差あるいは主応力差は等色線の縞次数 n に比例するから、つぎの関係が導かれる⁹⁾。

$$\sigma_1' - \sigma_2' = n/2ad'E' = E'/(1+\nu') \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (5)$$

$$\sigma_1' + \sigma_2' = f(n)/2ad'E' = E'/(1-\nu') \cdot (\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (6)$$

ただし σ_1', σ_2' : 皮膜の主応力, d' : 皮膜の厚さ, a : 光弾性感度, E' : 皮膜の弾性率, ν' : 皮膜のポアソン比, ϵ_1, ϵ_2 : 下地試験材の主ひずみ, $f(n) : n$ で表わした皮膜の応力成分の和 ($\sigma_x + \sigma_y$)。

ν' は 0.5 であるから、式 (5), (6) より、

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= 1/6 \cdot (1+\nu')/2ad'E' \cdot (f(n)+3n) \\ \epsilon_2 &= 1/6 \cdot (1+\nu')/2ad'E' \cdot (f(n)-3n) \end{aligned} \right\} (7)$$

したがって式 (7) の係数 $2ad'E'/(1+\nu')$ を求めておけば、等色線と等傾線図から皮膜の応力を解析することにより ϵ_1, ϵ_2 が求められる。なお等傾線は、下地試験材の主ひずみの方向を表わすから、主ひずみ線図も求めた。

解析の対象断面と座標軸は、図2と同様にとり、 $f(n)$ の解析はせん断応力差積分法によった。

(2) 皮膜と下地試験材の検定

皮膜を接着したせん断試料の縞次数と主ひずみ差の関

係を四点曲げ試験により検定した。図10は検定曲線であつて、下地試験材の曲げの表皮ひずみ ϵ とこれに対応する縞次数 n 、および曲げ荷重 F の関係を示した。 ϵ は試料の上下両面に接着した抵抗線ひずみゲージ（ゲージ長さ 10mm）で測定したが、本材料の曲げにおける引張

図10 皮膜と下地試験材料の検定

り側と圧縮側のひずみの絶対値はかなりよく一致し、E方向の引張りと圧縮の弾性率の差は僅少である。図10と式(6)の関係から $2ad'E'/(1+\nu')$ として 1.98×10^2 が得られる。なお皮膜の光弾性感度 a は約 1.4 mm/kg, また弾性率は約 52 kg/mm² であつて、下地試験材のそれより約 1 桁小さく、皮膜の接着による影響は小さい。

(3) 実験条件と実験方法

材料の拘束は両刃材料支持と両刃材料固定、クリヤランスは 0%, ダイス上材料の抑えはボルトで行ない、常温静的にせん断した。等色線と等傾線は同一試料、同一荷重で測定した。なお測定中の荷重とポンチ食込量 s の変動は、試験の性質上避けられないが、ひずみの解析が目的であるから、食込量を一定に保つように注意し、その変動は板厚百分率で 0.4% 以下であつた。せん断荷重 P_m , 試験荷重 P , このときのポンチ食込量を s とすると、 P/P_m は両刃材料支持と両刃材料固定でそれぞれ 0.92 と 0.88, ポンチ食込比 $r (=s/H)$ は 0.0591 と 0.0611 であり、いずれも 1 次割れ発生期に入っている。なお試料のせん断切り口は、1 次割れが発達し、大きいえぐれを生じる破断様式であつた。

3.3 実験結果

(1) 等色線・等傾線図・主ひずみ線図

図11に両刃材料固定の場合の等色線と等傾線図を示したが、両刃材料支持の場合も大差がなく、いずれも前項の光弾性のそれと類似である。等色線では、近似的に圧痕面の境界に板面にはほぼ垂直に零次ないし 1 次の縞を生じ、圧痕領域の内外では縞の形状が全く異質になる。

図 11 1次割れ発生期の等色線と等傾線図 (両刃材料固定)

等傾線図では、ポンチとダイスの刃先を結ぶ線上に主ひずみの対称軸を生じ、その角度は両刃材料支持の場合約 68° 、両刃材料固定の場合約 67° であつた。

図 12 1次割れ発生期の主ひずみ線図

図 12 は主ひずみ線図であつて、実線と点線でそれぞれ主ひずみ ϵ_1 と ϵ_2 を表わした。主ひずみ線図は光弾性の主応力線図と類似であり、圧痕面に接してデッドメタルの形式が見られる。これが前報⁷⁾で指摘した圧痕面上の表面割れの原因になると考えられる。

(2) 主ひずみ ϵ_1, ϵ_2

図 13 に断面 A, A', B, B' における主ひずみ分布を示した。縦軸は板厚であつて、上面がポンチ側、下面がダイス側である。横軸は主ひずみと試験時のポンチ食込比 r の比 $\epsilon_1/r, \epsilon_2/r$ で示した。

ϵ_2/r は全域が圧縮ひずみになる。 ϵ_1/r はおおむね引張りひずみになり、その絶対値は ϵ_2/r よりわずかに小さい。これらの主ひずみの絶対値は、クリアランス部分から遠ざかるに従つて急速に減少する。また主ひずみ分布の傾向は光弾性の主応力分布と類似であり、弾性変形期と 1 次割れ発生期の応力分布には著しい相違がない。

* 主応力 σ_1, σ_2 に対応する主ひずみをそれぞれ ϵ_1, ϵ_2 とする。

図 13 1次割れ発生期の主ひずみ (実線: 断面 A', B', 点線: 断面 A, B)

4. 1 次割れの発生機構

フェノールレジソ樹脂積層板は、もろい直交異方性材料であつて、該材料の破損ないし破壊条件はまだ明らかにされていない。そこで 1 次割れの性格を検討するに当たつて、まず引張り試験と圧縮試験による破壊状態を観察することにした。

4.1 単軸応力による破壊

図 9 において、異方性の主軸の一つは板面に垂直な方向 (F 方向) であり、他の二つは E 方向にある。そこで試験は、E 方向の引張りと圧縮、F 方向の圧縮、E F 面内で F 軸に 45° 方向の圧縮とについて行なつた。

まず E 方向の引張り試験は、基準面に対して平行・ $45^\circ \cdot 90^\circ$ の三方向について試験片の平行部の長さが 57.2 mm、その幅が 13 mm、材料が D-1・B-6・E-1、板厚が 1.6 と 2.4 mm、クロスヘッド速度が 0.5 mm/min~100 mm/min、試験温度が $20^\circ\text{C} \sim 185^\circ\text{C}$ の条件で行なつた。試料はシリカゲルデシケータ中で 48 時間以上乾燥させたものである。 20°C における降伏応力 (0.2% オフセット点の応力) σ_Y と破壊応力 σ_B の測定例を表 2 に示した。冷間打抜き用に開発された特殊材料 E-1 を除き、 σ_Y/σ_B はおおむね 0.8 以上であつて、塑性域はほとんどない。また板面内の異方性や板厚・製造ロットによる相違は僅少である。その破壊状態は、加熱温度や変形速度に関わりなく、どの材料も図 14 (i) のよ

表 2 通信用フェノールレジン積層板の機械的性質

荷重	材料	板厚	2) 負荷 方向	1) 降伏応力 ¹⁾ σ_Y (kg/ mm ²)		引張り (圧 縮)強さ ¹⁾ σ_B (kg/mm ²)		σ_Y/σ_B		
引 張 り	D-1	1.6	E	// ⊥ ×	9.9 10.1 10.0	12.3 11.8 12.4	10.9 11.1 11.1	12.3 12.8 12.6	0.91 0.91 0.90	0.99 0.92 0.98
	D-1	2.4	E		9.0	11.7	10.8	12.4	0.83	0.94
	B-6	1.6	E		10.8	13.3	11.7	13.0	0.92	0.97
	E-1	1.6	E		3.6	5.5	6.5	9.1	0.56	0.61
	E-1	2.4	E		3.8	5.7	6.9	9.1	0.56	0.64
	圧 縮	D-1	10	E		10.5		19.8		
D-1		10	F		15.9		29.8			0.53
D-1		10	F 45°		11.8		19.0			0.62
B-6		1.6	F		24.5		33.7			0.73
E-1		1.6	F		9.1		18.2			0.50

- 1) 左側の列はクロスヘッド速度が 0.5 mm/min, 右側の列は 50 mm/min
 2) 試料の採取方向 // : 平行, ⊥ : 直角, × : 45°

(i) 引張り
 (材料 E-1, E 方向,
 クロスヘッド速度
 0.5 mm/min)

(ii) 圧縮
 (材料 D-1, E 方向)

図 14 破壊の状態

うに引張り破壊が主体になるが、すべり破壊も併存している。

つぎに圧縮試験は、板厚 10 mm の D-1 について、E 方向が 10×10×20 mm 高の角柱、F 方向が 10 mm の立方柱を 2 個重ねたもの、E-F 面内で F 軸に 45° 方向が 7 mm の立方柱を 3 個重ねたもの、また B-6 と E-1 については、F 方向が板厚 1.6 mm、直径 12 mm の円板を 7 枚重ねた円柱を、それぞれ試験温度 20°C、クロスヘッド速度 0.5 mm/min で圧縮した。破壊は、いずれの場合もたとえば図 14(ii) のように負荷方向にほぼ 45° のすべり破壊である。

表 2 に圧縮降伏応力 (0.2% オフセット点の応力) と圧縮強さを示した。圧縮降伏応力は、どの材料も F 方向が E 方向より著しく大きい。また D-1 では、E 方向の圧縮降伏応力と引張り降伏応力は近似的に等しい。なお

破壊までの変形能は、E 方向の伸び率が数% に対して、圧縮による縮み率が、各負荷方向とも 10~20% であり、圧縮の方が著しく大きい。

4.2 1次割れの角度

1次割れの角度 α と、弾性変形期の主せん断応力 (第 1 せん断線)・主応力 σ_2 および 1 次割れ発生期の主せん断ひずみ・主ひずみ ϵ_2 の x 軸となす角度を比較した。

もとより、両者の対応は、材料の相違や異方性、加熱による材質的变化、測定時のポンチ食込比の相違などにより、厳密には成立しないが、1 次割れの性格についてのおおよそその見当はつけられる。図

図 15 1次割れの方

15 の断面 ab 上の測定結果を図 16 に示した。図 16 の縦軸は板厚であつて上面はポンチ側、下面はダイス側である。1 次割れは、材料の拘束や加熱条件、材質に関わりなく、いずれも主せん断応力ないし主せん断ひずみの

(i) 両刃材料支持 (ii) 両刃材料固定

(iii) 片刃材料支持 (iv) 片刃材料固定

図 16 1次割れと応力主軸の角度
 1 次割れの角度 α : ○ D-1, 135°C, 7 分
 ◻ D-1, 常温, □ B-6, 135°C, 7 分, × E-1 常温

方向に近接して生じている。すなわち前記材料試験による破壊状態も考慮すれば、1 次割れは材料のすべりによる脆性破壊であると考えられよう。

5. 結 言

圧痕領域内における弾性変形期の応力を光弾性により、1次割れ発生期の主ひずみを皮膜法実物光弾塑性によつて解析し、これらにおよぼす材料拘束、クリヤランス、ポンチ幅、圧痕幅の影響を検討したのち、材料試験による破壊状態を観察し、この結果と1次割れの角度と主応力・主ひずみの角度の比較結果とから、1次割れの性格を考察した。その結果を総括すると、

(1) せん断加工による主変形領域は、近似的に圧痕領域内に限られ、かつ、該領域内の応力分布は、弾性変形期と1次割れ発生期とで著しく相違しない。

(2) 板面に垂直方向の応力 σ_y は圧縮、水平方向の応力 σ_x はおおむね板の中央部分で引張り、自由表面と圧痕面近傍で圧縮になり、その絶対値は σ_y より小さい。せん断応力 τ_{xy} は圧痕面近傍の小部分を除けば負になる。また圧痕面上の σ_y の絶対値は、刃先から圧痕境界に向かって指数函数的に減少すると推定できる。

(3) 本実験の範囲では、おおむね圧痕面上の τ_{xy} の積分値が負、 y 軸上の σ_y の積分値が圧縮と推定されることから、加工初期の材料は全体として、クリヤランス部分から圧出される傾向をもつと考えられる。

(4) 主応力 σ_1 と主ひずみ ϵ_1 はおおむね引張り、 σ_2 と ϵ_2 は圧縮になりその絶対値は後者の方が大きい。

(5) クリヤランス部分の近傍においては、以上の応力分布や主ひずみ分布におよぼす材料の拘束条件、クリヤランス、ポンチ幅、圧痕幅の影響が少ない。

(6) 供試のフェノールレジン積層板は、板面内の異方性が少なく、かつ圧縮降伏応力はE方向よりF方向が大きい。その単軸応力による破壊は、引張り応力では引張り破壊が主であるが、すべり破壊も併存し、圧縮応力ではすべり破壊をする。

(7) 1次割れは、近似的に主せん断応力ないし主せん断ひずみの方向に沿つて生じ、すべりによる脆性破壊であると考えられる。

終わりに、終始懇切なる御指導を賜つた東大福井伸二博士、前田禎三博士、光弾性について御教示頂いた理化学研究所西田正孝博士、皮膜光弾塑性について御教示頂いた航空研究所河田幸三博士、種々の便宜を与えられた当所の元研究室長 鶴沢高吉氏(現日本電気株式会社)、光弾性材料の製作や装置について御援助を受けた当所線路課平岡祐二社員、実験や計算の遂行に熱心に協力された木下健次社員、増田武雄社員の方々に深く感謝する次第である。

(1962, 9月4日受付)

参 考 文 献

- 1) 北条英典, 木下健次, 増田武雄: 精密機械, 27巻, 12号 (1961) 1.
- 2) 益田森治, 神馬敬: 塑性加工専門講演会 (昭33—11) 15.
- 3) 箕浦貞, 駒井徳三郎: 大阪府立工業奨励館報告, No.22 (1959) 14.
- 4) たとえば応力測定技術研究会編: 応力測定法, 朝倉書店 (昭30—9) 549.
- 5) 河田幸三: 塑性と加工, 1巻2号 (1960) 77.