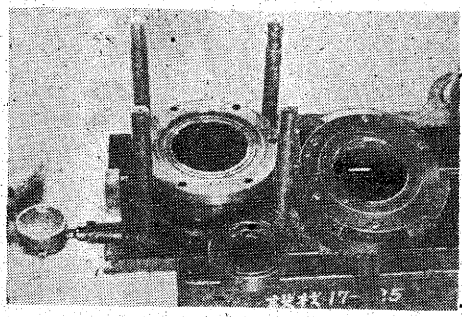


金属薄板の試験法

—とくに油圧試験 (Hydraulic Bulge Test) について—



山田嘉昭・輪竹千三郎

プレス作業における金属薄板の成型性(Formability)を判定する各種試験法について述べ、特に油圧試験法に重点をおいた。どの試験法が最も正しい結果を興えるかは今後の問題であるが、加工条件に近い試験法を用い、引張試験結果と関連させて、成型性を決めるべきである。

1 はしがき

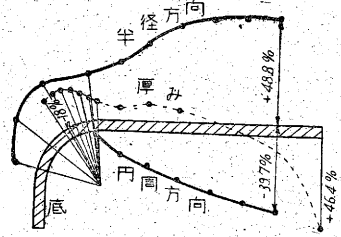
深絞りによつて加工される製品は多種である。われわれの周囲の臺所用品、ラジオ部品、玩具等の中にも深絞り製品を容易に見出すことができるであろう。中でも自動車工業は一面プレス工業ともいえるのであつて、自動車会社のプレス・ショップで加工される部品の数は驚べきものがある。

普通われわれの眼に觸れるのは良好な製品ばかりであるが、加工時には多くの不良品ができる。割れ、しわ、耳は明かに不良の原因であるが、塗装を行う場合には、加工後の表面の荒れ (stretcher strain や orange peel) 等も望ましくない。不良率を少なくするには、プレス作業を検討して型の設計を變えることも必要であるが、良質の材料が供給されることが先決である。以下薄板材料の性質を判定するための各種試験法について簡単に説明し、最後にわれわれの所で研究している油圧試験について述べる。

2 いろいろの試験法

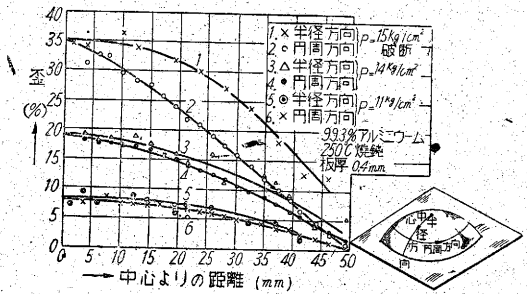
プレス作業において材料のうける變形は複雑、多種である。第1圖は圓形blankを深絞りした時の歪の分布第2圖は油圧試験における歪の分布を示している。これらの圖からわかるように、深絞り作業では圓周方向に壓

縮、半徑方向に引張應力が作用するが、外周では壓縮應力の影響の方が大きくて板厚がふえる。他方、油圧試験の應力状態は二軸引張であつてそのため板厚の減少は大きい。また自動車のフェンダーについて測定した結果によると、長手方向に伸びるが横方向の歪は0に近



第1圖 深絞りの歪分布 (藤井博士)

縮、半徑方向に引張應力が作用するが、外周では壓縮應力の影響の方が大きくて板厚がふえる。他方、油圧試験の應力状態は二軸引張であつてそのため板厚の減少は大きい。また自動車のフェンダーについて測定した結果によると、長手方向に伸びるが横方向の歪は0に近



第2圖 油圧試験の歪分布

かつた。第3圖は後述するエリクセン試験による歪の分布を興えるが、第1、第2圖との差異は明かである。

薄板使用者が材料を購入する場合、その材料が規格に合格しているかどうかを試験する。例を高級仕上鋼板の

* 終戦後わが國の鋼板の性質がいちじるしく悪くなつた際、各方面の技術者が集つて舊規格を検討してできあがつたのがこの規格である。寸法の許容差を明示したこと、化学成分が多少變更されたこと(特にCu成分についても觸れている)などの點で舊規格が改正されたが、新しく引張試験の項を加えたこと、エリクセン値が改められた點等も大きな特徴である。

研究

金属薄板の試験法	山田嘉昭	1
	輪竹千三郎	
無機鹽類結晶の變形	岡宗次郎	5
高速度で動くジャイロスコープの力學的研究	末岡清市	9
メッキの厚さ測定法	久松敬弘	14
	菅野昌義	
齒車ポンプの研究	宮津純	18
ラッピングについて	松永正久	23

學校およびアパートの構造設計資料	坪井善勝	30
	富井政英	

海外研究情報 —1—

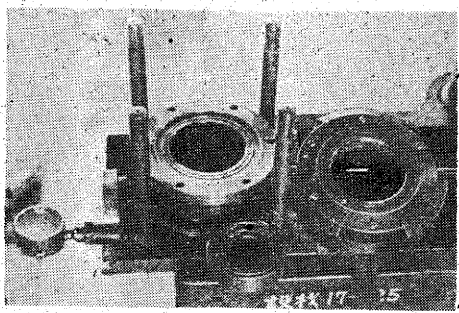
NYU 工科大学研究所		
オレゴン州立大學工學試験所		28

速報

1. 平板の水面衝撃	安藤良夫	27
	藤田口男	
生研ニュース・編集後記		36

金属薄板の試験法

—とくに油圧試験 (Hydraulic Bulge Test) について—



山田嘉昭・輪竹千三郎

プレス作業における金属薄板の成型性(Formability)を判定する各種試験法について述べ、特に油圧試験法に重点をおいた。どの試験法が最も正しい結果を興えるかは今後の問題であるが、加工条件に近い試験法を用い、引張試験結果と関連させて、成型性を決めるべきである。

1 はしがき

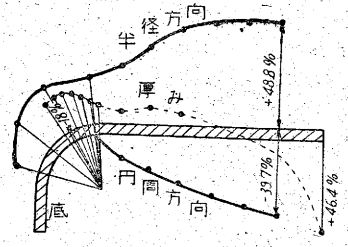
深絞りによつて加工される製品は多種である。われわれの周囲の臺所用品、ラジオ部品、玩具等の中にも深絞り製品を容易に見出すことができるであろう。中でも自動車工業は一面プレス工業ともいえるのであつて、自動車会社のプレス・ショップで加工される部品の数は驚べきものがある。

普通われわれの眼に觸れるのは良好な製品ばかりであるが、加工時には多くの不良品ができる。割れ、しわ、耳は明かに不良の原因であるが、塗装を行う場合には、加工後の表面の荒れ (stretcher strain や orange peel) 等も望ましくない。不良率を少なくするには、プレス作業を検討して型の設計を變えることも必要であるが、良質の材料が供給されることが先決である。以下薄板材料の性質を判定するための各種試験法について簡単に説明し、最後にわれわれの所で研究している油圧試験について述べる。

2 いろいろの試験法

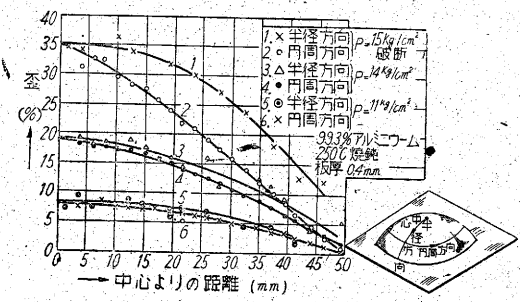
プレス作業において材料のうける變形は複雑、多種である。第1圖は圓形ブランクを深絞りした時の歪の分布第2圖は油圧試験における歪の分布を示している。これらの圖からわかるように、深絞り作業では圓周方向に壓

縮、半徑方向に引張應力が作用するが、外周では壓縮應力の影響の方が大きくて板厚がふえる。他方、油圧試験の應力状態は二軸引張であつてそのため板厚の減少は大きい。また自動車のフェンダーについて測定した結果によると、長手方向に伸びるが横方向の歪は0に近



第1圖 深絞りの歪分布 (飯井博士)

縮、半徑方向に引張應力が作用するが、外周では壓縮應力の影響の方が大きくて板厚がふえる。他方、油圧試験の應力状態は二軸引張であつてそのため板厚の減少は大きい。また自動車のフェンダーについて測定した結果によると、長手方向に伸びるが横方向の歪は0に近



第2圖 油圧試験の歪分布

かつた。第3圖は後述するエリクセン試験による歪の分布を興えるが、第1、第2圖との差異は明かである。

薄板使用者が材料を購入する場合、その材料が規格に合格しているかどうかを試験する。例を高級仕上鋼板の

* 終戦後わが國の鋼板の性質がいちじるしく悪くなつた際、各方面の技術者が集つて舊規格を檢討してできあがつたのがこの規格である。寸法の許容差を明示したこと、化學成分が多少變更されたこと(特にCu成分についても觸れている)などの點で舊規格が改正されたが、新しく引張試験の項を加えたこと、エリクセン値が改められた點等も大きな特徴である。

研究

金属薄板の試験法	山田嘉昭	1
	輪竹千三郎	
無機鹽類結晶の變形	岡宗次郎	5
高速度で動くジャイロスコープの力學的研究	末岡清市	9
メッキの厚さ測定法	久松敬弘	14
	菅野昌義	
齒車ポンプの研究	宮津純	18
ラッピングについて	松永正久	23

學校およびアパートの構造設計資料	坪井善勝	30
	富井政英	

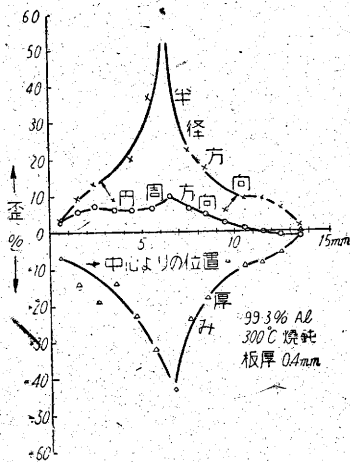
海外研究情報 — 1 —

NYU 工科大学研究所		
オレゴン州立大學工學試験所		28

速報

1. 平板の水面衝撃	安藤良夫	27
	藤田口勇	
生研ニュース・編集後記		36

規格 JIS G 3305* にとって試験法を説明しよう。この規格は機械的試験として、引張試験 (JIS 5 号試験片による)、曲げ試験およびエリクセン試験を規定している。しかし上に述べたように、加工方法によつて變形の様子が違うから規格に定められた

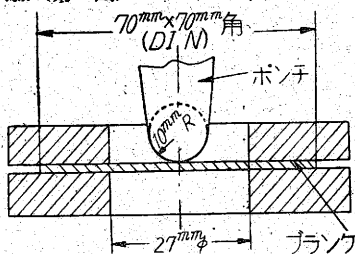


第3圖 エリクセン試験の歪分布

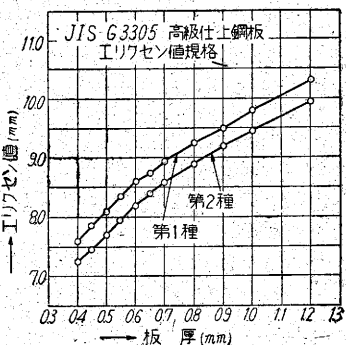
試験だけでは十分といえない。たとえば二方向に引張をうける加工に對しては油壓試験を用いた方がよいと思われる。したがつて材料が加工時にうける變形に應じて異つた試験法を用いる必要があるということになるが、他方實際上、特に現場では、なるべく簡単な一二の試験によつて材料の成型性を知りたいという要求がある。各種試験法についての研究もかなりあり、工場における不良率との関係も調べられているが、まだ最後の結論は得られていない。今後の問題として、各試験法の特長とおのおのの測定値間の關連の研究、薄板の成型性を確實に決定する簡便な方法などの問題が残されている。つぎに簡単に各種試験法について述べよう。

a) エリクセン試験 (第4圖) 70×70 mm 角 (DIN)

のブランクを試験機にとりつけ、半径 10 mm の球面を持つた工具を用いて押壓し、キレツを生じた時の深さをエリクセン値とする。第5圖は JIS G 3305 による高級仕上鋼板第1種、第2種のエリクセン値規格を示したものである。圖から明かなように、板厚によつてエリクセン値が異つていて、同一材料について板厚の大きいものほど値



第4圖 エリクセン試験



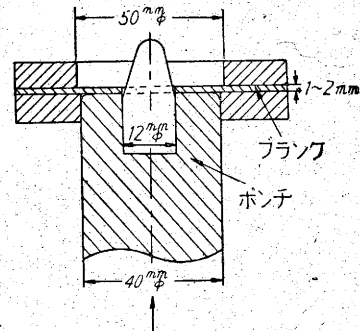
第5圖

が大である。おそらくこれは、引張試験におけると同じく、エリクセン試験でも板厚によつて局部伸びに差があり、また曲げによる應力が無視してもよい大きさであるためであろう。なおこの試験ではポンチと板の間の摩擦によつて測定値が影響をうける。

米國ではオルゼン試験機が用いられているが、ダイとポンチの寸法 (ポンチ先端の球の標準直徑=7/8") が異なること、ポンチ力の測定および試験速度の調節が可能であること以外はエリクセン試験機と同じである。

b) 孔擴げ試験 (第6圖) 中央に孔のあるブランク

を圖のようなポンチで押壓し孔の周邊にキレツを生じた時の孔の寸法を測定して、孔径の増加率を成型性の尺度とする。この試験法における應力状態は二軸引張 (孔の周邊では單純引張) である。

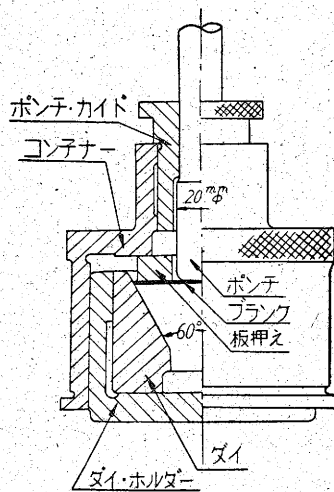


第6圖 孔擴げ試験

ドラム罐の口つけなどは孔擴げ加工であるから、そのような場合の試験法として用いれば最適であろう。

c) コニカル・ダイによる深絞り試験 (第7圖) 理工

研の福井博士の提案されたもので、角度 60° のダイの中にブランクをおき、ポンチで絞る。絞りが可能なブランクの最大直徑 D_0 を求め、試験後のカップの内徑を d としたとき、 d/D_0 を限界絞り率とする。その他 AEG 試験として知られている試験法は、コニカル・ダイの代りに平面ダイを用いる深絞り試験である。平面ダイによる深絞り試験ではしわ押えがいるが、コニカル・ダイを用いる場合にはしわ押えを必要としない。



第7圖 コニカル・ダイ

(福井博士)

d) 引張試験 材料の引張試験から得られる應力-歪線圖、伸び等の測定値から成型限を決める方法である。

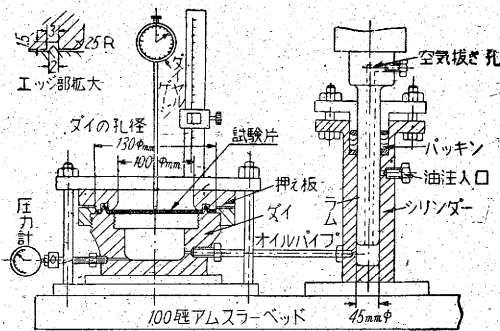
普通用いられる應力-歪線圖の代りに、眞應力 (σ) 對數歪 (ϵ) 線圖, または octahedral shearing stress (τ_{oct}) - octahedral shear strain (γ_{oct})* の關係を用いると、塑性加工の研究に便である。これらの線圖と各試験法における變形の間には關連がある。もしこの關係が理論的にわかると、局部伸びが発生前における、材料中の應力と歪の分布を求めることができる。しかし局部伸びが発生する直前までの伸び(一様伸び)は加工方法によつて異なるから、普通の形の試験片(たとえば JIS 5 號試験片)による試験のみでは成型限を決めることができない場合がある。そこで寸法の異なる各種の試験片による伸びの測定値や、切欠きのある試験片による結果から、プレス作業における材料の成型限を求めようとする研究も行われている。

e) 油壓試験 1930 年 Jovignot によつて提案されたものであるが、stretch forming (材料を引張りながら同時に曲げを加える加工法) 等の二軸引張力の作用する加工法が行われるようになったため再び注目をひき、最近 Al 合金を對象とした研究が發表されている (1, 2, 3)。この試験法については次に詳しく述べる。

3 油壓試験について

終戦後わが國の鋼板の性質が悪くなつて、その対策が協議されたとき、われわれの實驗室で薄板の油壓試験を行う計畫をたてた。最近装置が完成し、二三の實驗結果が得られたのでその結果を報告する。

a) 装置 第8圖の左側は試験装置本體で、この部分



第8圖 油壓試験装置

に試験片を固定する。右側は壓力發生部で、シリンダーとラムによつて生じた油壓はパイプ・ラインを経て試験

*3つの主應力方向と同一角度で交わる面内の剪断應力と剪断歪をいふ、主應力および歪をそれぞれ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ とすると

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$\gamma_{oct} = \frac{2}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}$$

である。對數歪 ϵ と普通の歪 ϵ の間には $\epsilon = \log_e(1 + \epsilon)$ の關係がある。引張試験では、 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$; $\epsilon_1 = \epsilon$, $\epsilon_2 = \epsilon_3 = -2\epsilon/3$ であるから $\tau_{oct} = \sqrt{2}/3 \sigma$, $\gamma_{oct} = \sqrt{2}/3 \epsilon$ となる。

片の下方向にえられる。全装置を 250 kg/cm² に耐えるように設計し、ダイの孔徑を 60 mm および 100 mm とした。試験片をダイと押え板の間に固定するために4本のボルトを用い、油の洩れを圖に示すような突起によつてふせいた。最初、革、ゴム、布等のバッキンをを用いたが、壓力が高くなると油が洩り、またバッキンを介する方法では締付けが十分でないので試験片の周邊にしわが発生して(しわが発生すれば油は自由にその部分から洩れる)困つた。種々検討の結果、突起と溝を採用することとしたが、現在のところ 200 kg/cm² までの壓力下の實驗では十分安全である。ただし薄い板 (0.5 mm 以下の Al 板等) の場合には締付けを適度にしないと、突起部で板が切れることがある。押え板の内縁に半徑 2.5 mm の丸味をつけた。目下實驗中の軟鋼板および Al 板ではこの半徑で十分で、曲げのためこの部分で試験片の切れることはないが、伸びの足りない材料ではもつと大きい丸味をつける必要がある。

b) 材料 次の2種の材料を用い、焼鈍温度を變えて實驗した。

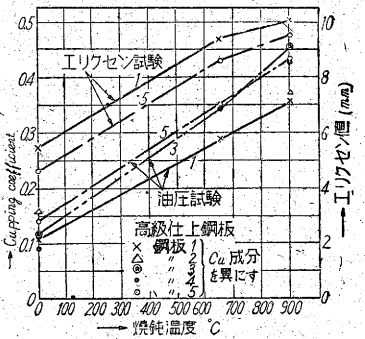
- (1) 高級仕上鋼板 (板厚 1 mm) … 壓延のまま; 焼鈍温度 650° および 900°C.
- (2) 99.3% Al 板 (板厚 0.4 mm) … 壓延のまま; 焼鈍温度 100°, 200°, 250°, 300°, 400°C の5種.

なお高級仕上鋼板は、Cu 含有量の影響をみるために、0.33~0.65% の Cu を特別に加えたものである。

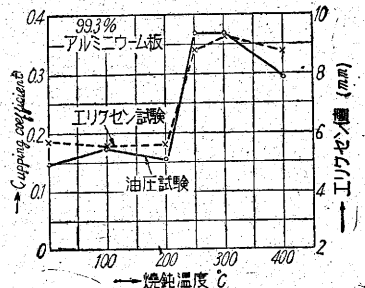
c) 實驗結果

全装置をアムスラー 100 t 試験機にのせ、ベッドを上にあけて油壓をかけると試験片は膨れ、壓力の値がある大きさに達すると破裂する。變形の高さおよび油壓をそれぞれダイヤル・ゲージおよび壓力計で測定した。

第9, 10圖はそれぞれ鋼板および Al についてエリクセン値と“cupping coefficient”を示す。cupping coefficient は、 h/r をそれぞれ破断

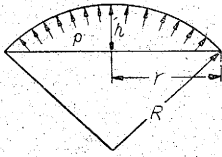


第9圖



第10圖

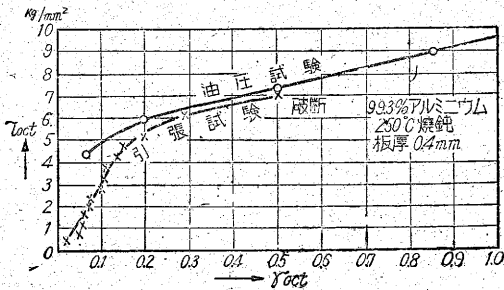
時の高さおよびダイの孔半径としたとき、 h^2/r^2 で與えられ、試験片の表面積の増加をあらわす(第11圖)。兩試験値を比較すると、焼鈍条件を變えた場合ほぼ同じ傾向をもっていることがわかる。ただ興味あることは曲線5 (Cu=0.63%) と1 (Cu=0.33%) のエリクセン値と油壓試験値が大小逆になっていることである。試験結



第11圖

果の数が少ないので早急に結論を下せないが、これはCu成分によつて局部伸びに差があり、エリクセン値は局部伸びの影響をうけることが多いが、油壓試験値は影響をうけることが少ないためではないかと思われる。

次に變形の途中で壓力を止め、各變形段階の歪の分布を求めた。前にかかげた第2圖はAlについてこのようにして得たものである。それには、あらかじめ試験片表面にphotogridを焼きつけておき(4)、變形後格子間隔をコンパレータとダイヤル・ゲージを組合せて測定し、その値を用いて歪を計算する。第2圖から、破断直前ではわずかの壓力の増加($p=14$ から 15 kg/cm^2 への増加)によつて急に變形が進むことがわかる。また各段階における測定値を用い、次のようにして應力-歪線圖(τ_{oct} - ϵ_{oct} 線圖)を求めて第12圖に示した。すなわち油壓試験では頂部の應力状態が二軸引張であるから、頂部の伸びおよび厚みの變化を ϵ_r, ϵ_t ; 各々の對數歪を ϵ_r, ϵ_t ;



第12圖

眞の引張應力を σ_r としたとき

$$\tau_{oct} = 2\sqrt{2}\epsilon_r = -\sqrt{2}\epsilon_t, \quad \tau_{oct} = \sqrt{2}\sigma_r/3 \quad [1]$$

$$\epsilon_x = \log_e(1 + \epsilon_r),$$

$$\epsilon_t = \log_e(1 + \epsilon_t)$$

によつて τ_{oct} および σ_{oct} を計算すればよい。 σ_r を求めるには油壓によつて變形した形を球の一部と考え、薄肉球殻の理論式

$$\sigma_r = \frac{pR}{2t} = \frac{p}{2t} \frac{r^2 + h^2}{2h} \quad [2]$$

を用いる。ただし p は油壓、 h は各段階の變形の高さ、 r =ダイの孔の半径、 R =頂部の曲率半径である。

厚さ t は頂部の眞の厚さで、最初の厚さ t_0 に對し

$$t = t_0 e^{-2\epsilon_r} \quad [3]$$

の關係がある(第11圖参照)。第12圖には引張試験によつて得られる眞應力-對數歪曲線を、 τ_{oct} - τ_{oct} の關係に換算して求めた曲線も畫いてある。兩曲線にわずかの差があるが、實驗の数が少ないので、本當に差があるものか實驗誤差によるものか結論を下し得るまでに至っていない。ただ引張試験では $\tau_{oct}=0.5$ (對數歪 $\epsilon=0.35$ に相當する)の一樣伸びしかないが、油壓試験の伸びははるかに大きい。このように油壓試験における一樣伸びが大きい理由として、Sachs(1)は變形によつて頂部の曲率が増加し局部伸びが阻止されるためであるとしている。

d) 油壓試験の特徴 前に述べたようにエリクセン値は板厚の影響をうけるが、油壓試験から求めた h/r の値は板厚の影響をうけない。これは同一材料についてダイの半径 r および板厚 t_0 を變えて實驗すると、 pr/t_0 で與えられる値が一定値に達したとき破断が起り、しかもその時の深さ h と r の比 h/r も一定であることが理論的にも實驗的にもわかつているからである。したがつて油壓試験の結果は破断時の深さ h の値ではなく、 h/r またはcupping coefficient h^2/r^2 で比較すべきである。くわしい理論にふれることができなかったが、目下實驗と併行して理論的研究も進めている。なおかかげた實驗結果は豫備實驗の結果であつて、これをもとにしてさらに測定精度をあげるべく努力している。

4 結語

われわれの實驗室で行つている油壓試験を主な對象として薄板の各種試験法について述べ、引張試験との關連についても觸れた。目下油壓試験に關する實驗と併行して各種試験法に關する實驗を計畫しているので、理論的研究の結果とあわせて、他日發表の機會を待ちたい。

なお油壓試験装置の試作については、いすゞ自動車の好意ある援助をうけたことを感謝する。またこの研究の一部は文部省科學研究費によるものであることを附記する。(26, 10, 22 受)

文 献

1. Sachs, G. & Espey, G., Trans. ASME, Feb, 1946.
2. Brown, W.F. & Sachs, G., Trans. ASME, April, 1948.
3. Lankford, W.T., Special Technical Publication No. 87, ASTM, 1949.
4. 山田, 輪竹外, 格子焼付法, 本誌3卷12號(1951, 12月)