

円筒のテーパピンとのはめあい実験*

柴 原 正 雄 二 村 佑 次

Experiments on the Strength of Thick Cylinders Fitted by a Taper Pin

by

Masao SHIBAHARA and Yuji FUTAMURA

In the previous papers, one of the authors reported the strength of the circular-plates having a tapered hole fitted by the cylindrical pin, moreover made sure of tightness of fits between pins, bushings and tapered holes of the roller chain link-plates worked by punching shear.

In the present paper, we treated the thick cylinder under the press-fit of the taper pin. We analysed the stresses and the outer boundary deformation, by using three-dimensional photo-elastic method, moreover electric measuring method by the wire-resistance strain gauges.

As the results of experiments, we have found the follows:

Radial and tangential normal stresses, when the fitting compressive load is taken off, are larger than two-dimensional theoretical values, and the axial normal stress and the shearing stress are characteristic of the press-fit. The magnitude and the direction of these stresses depend on the each contact condition of the boundary between the taper pin and the cylinder.

Plastic-deformation of the cylinder at the outer periphery is occurred according to the degree of taper of the fitted-pin to the cylinder. That is, cylinderness of axial outer profile corresponds to about 50 % of taper of the fitted pin, and longitudinal contraction is negative in case of slow taper.

1. 結 言

せん断打抜きで穴をあけられた板材にピンやブシュを圧入はめあわせた場合、打抜きの際のポンチ側とダイス側とで穴径に差が生ずるための円筒度の不正、すなわちテーパ穴が締結効果にいかなる影響を及ぼすかについては、実用ローラチェーンのリンクプレートを対象として板厚や締めしろなどとの相互関連性においてピン、ブシュの離脱抵抗押出荷重値の実状の検討とそれらにおいて考慮すべき必要かつ十分な緊締力の大きさ、それを実際に発生さすべき必要締めしろ量の基準値の確立、ならびに一般円環プレートにおけるテーパ穴はめあい時の諸特性、すなわち応力、変形などのテーパ度合いと圧入深さによる変化状態などを筆者の一人がさきに報告を行い¹⁾²⁾³⁾、チェーンリンクのみならず関連類似要素の製作設計とそれらの適性使用とに対する資料を考察、提示している。

本報では上記研究に引き続き、二次元的考察に止まる板材供試片の代りに円筒を対象とし、従来明確にされていなかったはめあいにおけるテーパの三次元的影響を究明吟味した実験結果につき報告す

* 昭和 39 年 9 月 25 日 日本機械学会、精機学会連合金沢地方講演会において一部講演予定。

ることとする。すなわち、ここでは内外周ともに円筒度の正しい中空厚肉円筒を供試片とし、これに円筒度の不正に仕上がったピン、すなわちテーパピンが圧入された場合、そのはめあいによって円筒に生ずる応力、変形の状況を凍結三次元光弾性実験と鋼製模型ひずみ測定実験によって解析検討し、圧入ピンにテーパのある場合の弾性域と塑性域にわたるはめあい時の挙動変化につき述べるものである。

2. 凍結光弾性実験による三次元応力の解析

テーパピンの圧入によって円筒に生ずる三次元応力の状態を求めるため、第1表に示すような寸法の円筒とテーパピンの3組を作製して光弾性実験の供試片とした。円筒材はすべてアラルダイト注型用樹脂Bを用い、 120°C に14時間保って硬化させたものであり、旋削作業によって慎重に所定寸法に仕上げた。ピンの圧入実施は光弾性炉中に圧入ジグを設置して圧入時の傾き発生を防止しつつ 120°C で行い、50分間保温後の徐冷速度は毎時 5°C とした。

なお供試アラルダイトの 120°C における縦弾性係数は $E = 1.93 \text{ kg/mm}^2$ 、応力光定数は $\alpha = 39.8 \text{ mm/kg}$ であることをそれぞれ実験によって確認した。次にピンはその先端寸法を円筒穴径 $2R_1$ に等しくして締めしろなく、長さ l の根元部 d を太めてテーパと締めしろを与えることとした。すなわち、テーパは $\beta = 100(d - 2R_1)/l$ %であり、圧入深さ t

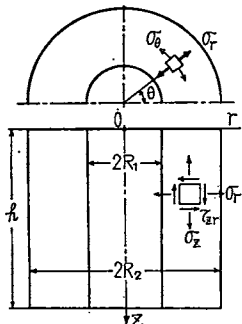
第1表 光弾性応力解析用供試円筒とピンの寸法

試片番号		1	2	3
各部寸法				
円筒	内径 $2R_1 \text{ mm}$	10.00	15.13	15.12
	外径 $2R_2 \text{ mm}$	26.00	38.97	39.01
	$m = R_2/R_1$	2.600	2.576	2.580
	高さ $h \text{ mm}$	25.16	37.19	37.23
ピン	テーパ $\beta \text{ \%}$	3.364	5.250	4.136
	最大値 $\delta \text{ mm}$	0.902	1.819	1.530
	$\epsilon = \delta / 2R_1 \text{ \%}$	9.020	12.022	10.119

の場合における上端面の締めしろは $t\beta/100$ となるようにしたものである。

さて円筒に対するテーパピンの圧入条件として、まずピンがほとんど剛体とみなしうる単純な場合に対するものとしてNo. 1, 2のはめあいは真鍮棒でピンを作製し、このうちでまたNo. 1は特に条件を単純化するため圧入完了後も圧入荷重をそのまま保持し、一般の外力作用状態の凍結実験と同様に除冷終了後に至ってはじめて除荷したものである。すなわちピンの円筒への圧入は完了してはいるが、まだピンには圧入荷重が作用したままとなっている当時の応力状態そのままを求めようとしたものである。それに対してNo. 2は圧入完了後数分間で直ちに除荷したものであって、規定深さまで圧入が行われればピンに対する軸圧縮荷重を除いてしまう実用圧入条件に対応させたわけである。次にNo. 3はNo. 2と同一圧入条件であるが、ピン材も円筒材と同一のアラルダイト注型材であって、全く実用の場合のテーパピン圧入時における応力状態を解析するを目的としたものである。

さて円筒に対する座標軸と三次元諸応力記号を第1図のようにとり、軸対称応力の光弾性的解析手法⁴⁾によって上記各場合に対するはめあい応力を求めた結果を図示すれば第2図～第13図となる。第2～5図はNo. 1, 第6～9図はNo. 2, 第10～13図はNo. 3の、それぞれの三軸垂直応力 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ およびせん断応力 τ_{rz} と応力光定数 α との積を示すものであるが、図はすべて横軸に円筒圧入上端面からの断面位置を円筒高さ h との比で表わす z/h をとり、中心からの距離 r と円筒内半径 R_1 との比 r/R_1 をパラメータとした応力状態である。すなわち $r = R_1, R_2$ なる内外周辺

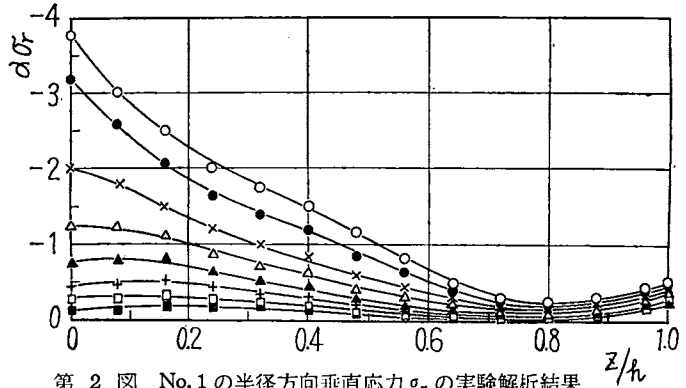


第1図 円筒の座標と応力記号

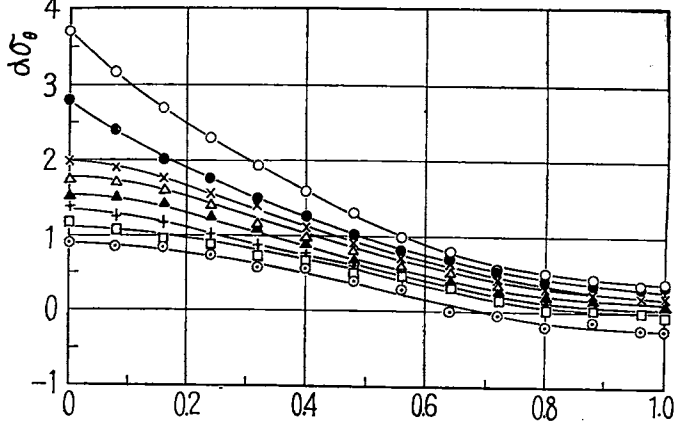
間を8等分して $r/R_1=1.0$ (内周) を○, 1.2を●, 1.4を×, 1.6を△, 1.8を▲, 2.0を+, 2.2を□ 2.4を■, 2.6 (外周) を⊙印でそれぞれ表わして図示したもので, 円筒各部における各応力値の r, z による変化状態を知ることができるわけである。

これらの結果のうち, まず各供試片の任意横断面での締めしろは z に比例して減少するものであることを考慮して σ_r, σ_θ の分布状態の概略的傾向を観察すれば, それらは厚肉円筒に内圧が作用する場合の普通の二次元応力状態に大体類似の傾向を持っているようである。ただしテーパピンと直接接する円筒内周辺 ($r/R_1=1.0$) 近傍では, はめあいの影響を受けていることはもちろんで, それぞれの圧入条件に対応する応力変動を明らかに示している。No. 1 では圧入完了後も圧入荷重はそのまま負荷されたままであるため, z による応力値の減少量が多いほかはほぼ単調変化を示しているのに対し, No. 2 および No. 3 では圧入完了後直ちに除荷が行われたものであるため圧入テーパピンの跳ね返りの傾向があるはずで, 円筒内周接触各部の応力状態はそれに応じて攪乱されることになり, 圧入端に近い円筒の上半で接触内周辺の σ_θ は低減するか, あるいは $r/R_1 = 1.2 \sim 1.4$ 程度の内周近傍の内部位置ではかえって上昇する傾向の状態となっている。

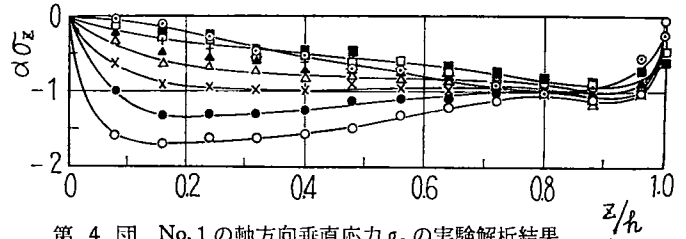
$z/h=0$ (圧入上端面) 0.25, 0.50 (中央部) および 0.75 の円筒横断面において, 普通の二次元応力状態として各断面位置における締めしろ量より算出される σ_r, σ_θ の値と本場合のテーパピン圧入による上記三



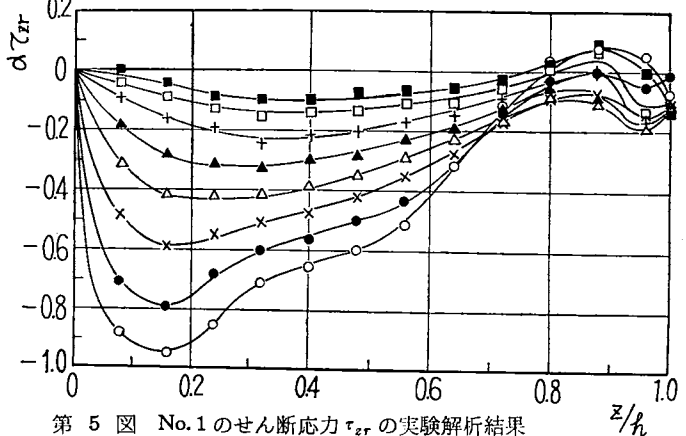
第 2 図 No.1 の半径方向垂直応力 σ_r の実験解析結果



第 3 図 No.1 の円周方向垂直応力 σ_θ の実験解析結果 z/h



第 4 図 No.1 の軸方向垂直応力 σ_z の実験解析結果

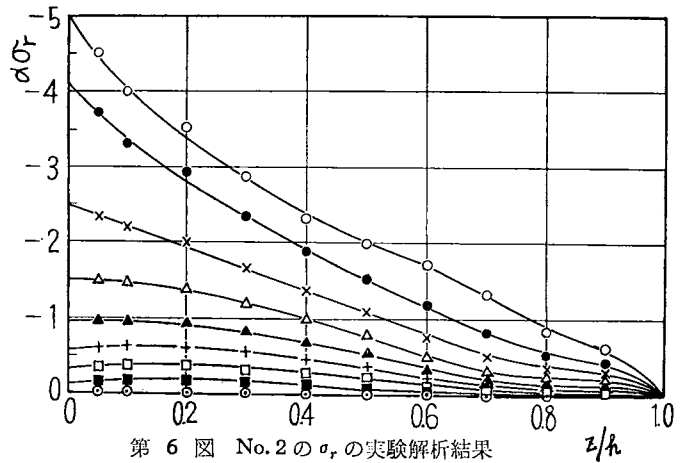
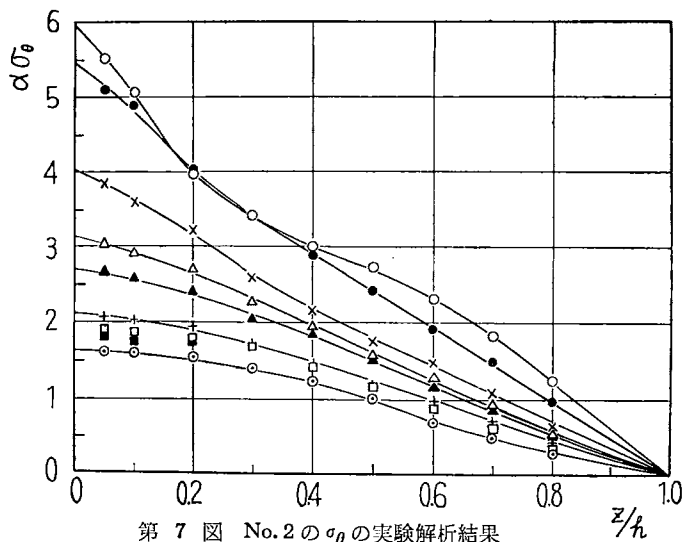
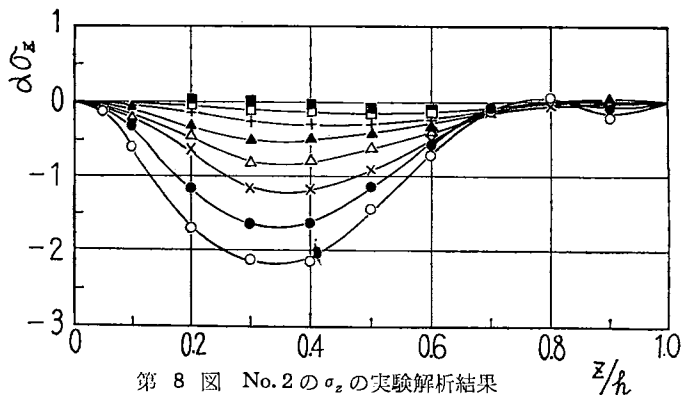


第 5 図 No.1 のせん断応力 τ_{zr} の実験解析結果 z/h

次元実験解析結果とがいかなる関係にあるかを詳細に比較検討してみることとし、第2表には最大締めしろより算出される圧入端面 ($z=0$) における二次元垂直応力を念のため表示した。No. 1, No. 2 に対しては真鍮ピンの弾性係数はアラルダイト円筒のそれよりはきわめて大きいことを考慮して接触圧力は $(\delta/2R_1)E/\{(m^2+1)/(m^2-1)+\nu\}$ 、また No. 3 に対してはピン、円筒ともに同一のアラルダイト製であることから $(\delta/2R_1)E/\{2m^2/(m^2-1)\}$ で算出したことはもちろんであり、また ν はアラルダイトのポアソン比で 0.5 とした。上記各横断面位置につき、本場合との比較を図示したのが第14~17図 (No. 1), 第18~21図 (No. 2), 第22~25図 (No. 3) であって、図では算出二次元応力値はすべて実線で、また実験の三次元解析結果は $\alpha\sigma_r$ を◎印で、 $\alpha\sigma_\theta$ を○印で記入した。

さて以上の図示結果を吟味すれば、二次元計算値に比較して次の事項が結論できることになる。すなわち No. 1 の σ_r (以下絶対値を対象とする) は圧入上端面では内周近傍でやや大きいほかは二次元的分布によく一致している。しかし z とともに内周近さらには内周近傍までの値が順次小さくなっている。また σ_θ は全般に二次元的値よりは小さく、特に内周に近い位置ほどその差は大きい。要するに No. 1 では圧入上端面の内周近くで σ_r のみ大きくなる傾向を持つほかは、すべて二次元的分布状態とみなした場合より大きくはならず、普通の計算値を用いれば十分安全側にあることとなる。

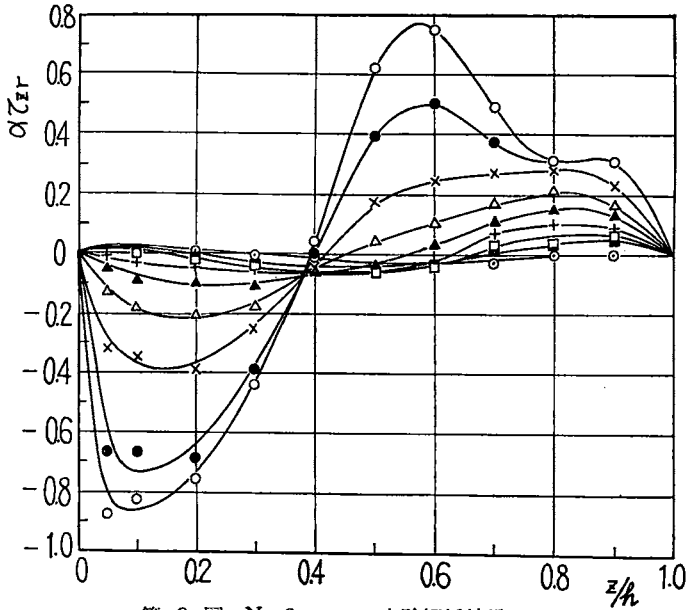
No. 2 の σ_r については、圧入端面近くでは No. 1 に類似はしている

第6図 No. 2 の σ_r の実験解析結果第7図 No. 2 の σ_θ の実験解析結果第8図 No. 2 の σ_z の実験解析結果

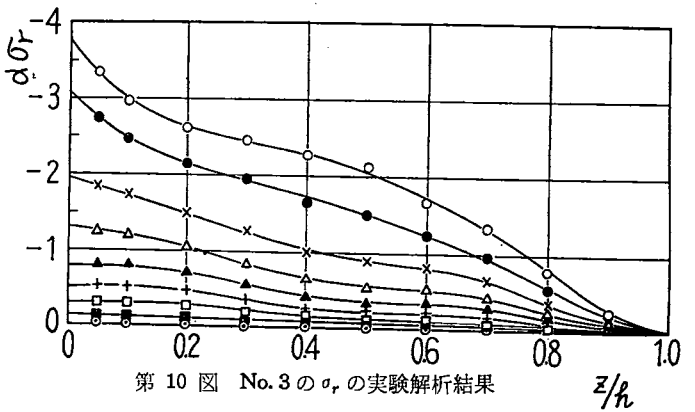
が z の増加につれても低下せず、また σ_θ についても内周値のみがはめあいの影響で低下するほかは、ほぼよく二次元的分布とみなした計算値に一致するものである。すなわち剛体ピンを圧入し、除荷した後のはめあい応力の σ_r , σ_θ は、それぞれの断面位置における締めしろ量から算出される二次元応力に等しいものとみなしてさしつかえないものといえよう。

しかし実際問題として同質ピンを圧入する場合に相当する No. 3 では第 22 ~ 25 図で明らかなように、上端面以外の内周の σ_θ は低下の傾向は持っているがその他では σ_r , σ_θ ともにすべて二次元分布とみなした計算値より大きく、その傾向は内周近傍ほど強くなっている。したがって実際のテーパピン圧入における σ_r , σ_θ は上記の No. 1 No. 2 と相違して最も条件が悪く、一般のはめあいに対する二次元的計算式による値よりも大きい応力値に到達しているものといわねばならず、圧入上端面内周で約 10 %、中央横断面内周近傍では約 60 % も σ_θ が上昇することには特に留意しなければならない。

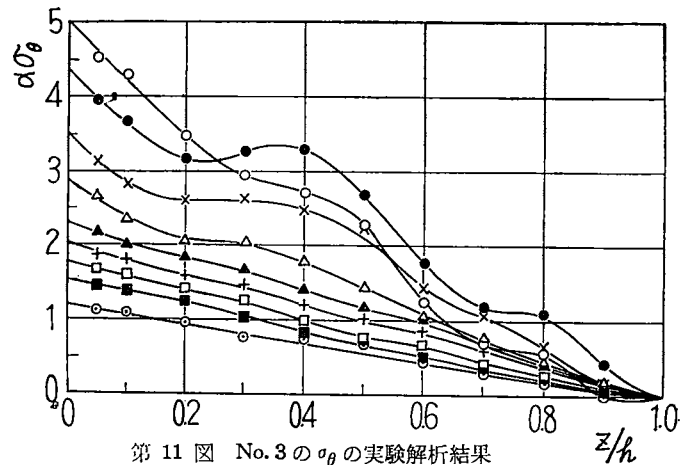
次に一般の二次元的取り扱いでは全く未知である軸方向垂直応力 σ_z およびせん断応力 τ_{zr} について検討しよう。それらは第 4, 5 図 (No. 1) 第 8, 9 図 (No. 2) および第 12, 13 図 (No. 3) で示されているものであるが、いずれにしても σ_z (以下その絶対値を対象とする) は σ_r , σ_θ に比較すれば小さく、特に τ_{zr} (以下絶対値を指す) の大きさは僅少であることは明らかである。しかし各圧入条件に対応してそれぞれ特異な分布状況となっていることは興味あ



第 9 図 No. 2 の τ_{zr} の実験解析結果



第 10 図 No. 3 の σ_r の実験解析結果



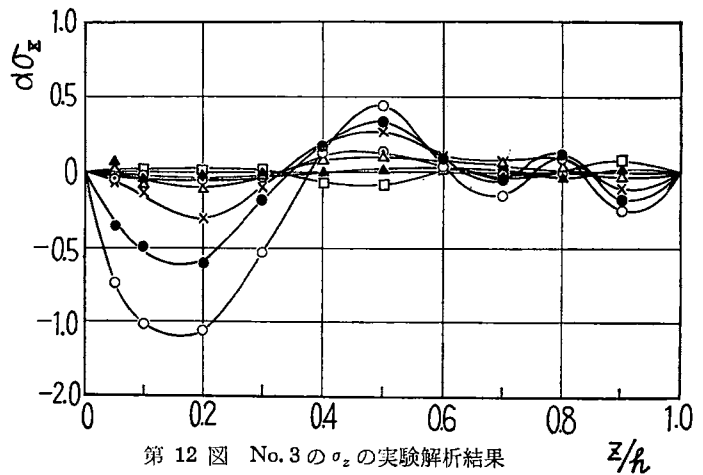
第 11 図 No. 3 の σ_θ の実験解析結果

第 2 表 各供試円筒のピン圧入端面 ($z=0$) における二次元垂直応力の計算値 $\alpha\sigma$

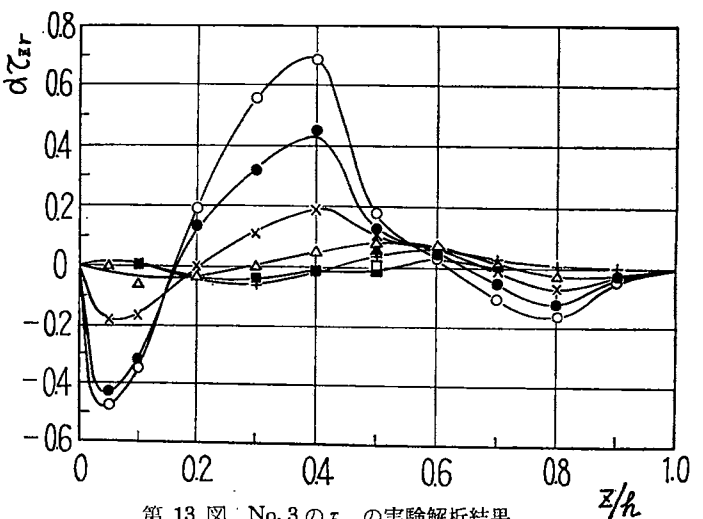
(mm/kg · kg/mm²)

No.	r/R_1 応力	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
1	$\alpha\sigma_r$	-3.752	-2.406	-1.595	-1.069	-0.708	-0.449	-0.258	-0.113	0
	$\alpha\sigma_\theta$	5.054	3.709	2.898	2.371	2.010	1.752	1.561	1.416	1.303
2	$\alpha\sigma_r$	-4.978	-3.187	-2.107	-1.406	-0.925	-0.582	-0.328	-0.134	0
	$\alpha\sigma_\theta$	6.746	4.954	3.875	3.174	2.693	2.349	2.095	1.901	1.768
3	$\alpha\sigma_r$	-3.324	-2.129	-1.408	-0.940	-0.620	-0.390	-0.220	-0.092	0
	$\alpha\sigma_\theta$	4.499	3.304	2.583	2.116	1.795	1.566	1.396	1.267	1.175

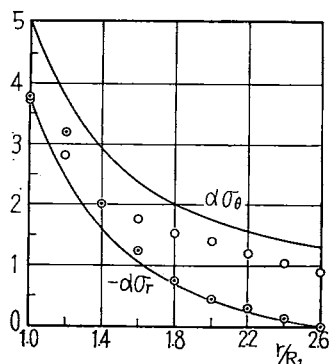
る点でもあり、またテーパピン圧入時の特徴で注目すべき点であろう。すなわち圧入荷重はピンを介して円筒に伝えられるため、ピンとの接触内周部より円筒外周部へと r の増加にしたがって σ_z , τ_{zr} は減少するものであることはもちろんであるが、それらの z による変化は全く圧入はめあいの条件によって異った様相を呈することになる。No. 1 の圧入荷重を受けたままの状態では、圧入上端面近傍 ($z/h=0.15\sim0.3$) で最大値を示したあとは下端部に行くにつれてほぼ z に比例して減少低下の傾向を持ち、ただ円筒外周近傍の σ_z は上記と逆で、下部支台よりの支持反力を受けるため下面近くほど大きくなっている。この下端面とその近辺での支持反力の影響は、 σ_r , τ_{zr} の分布攪乱によってもうかがうことができる。しかるに No. 2 のように圧入完了後、圧入荷重を完全に除去してしまえば円筒ひずみの回復、ピンの跳ね返りが発生し、これが一旦発生した σ_z , τ_{zr} の分布状態の変貌を来すはずである。その結果第 8, 9 図のように σ_z は下端部近くでほとんど消滅し、 $z/h=0.35$ 近くで極値を持ってほぼ対称的に $z/h<0.7$ の範囲内に分布し、また τ_{zr} は z/h



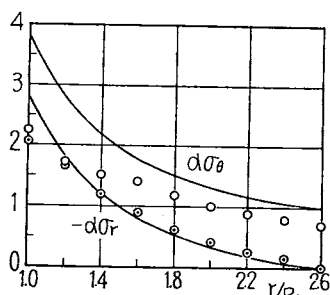
第 12 図 No. 3 の σ_z の実験解析結果



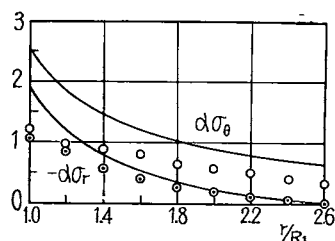
第 13 図 No. 3 の τ_{zr} の実験解析結果



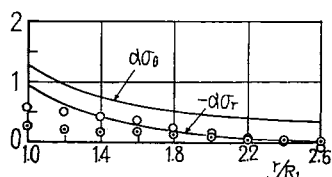
第 14 図 二次元計算値と実験解析結果との比較 No. 1, $z/h=0$



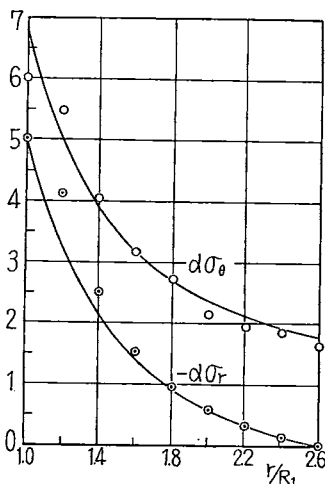
第 15 図 No. 1, $z/h=0.25$



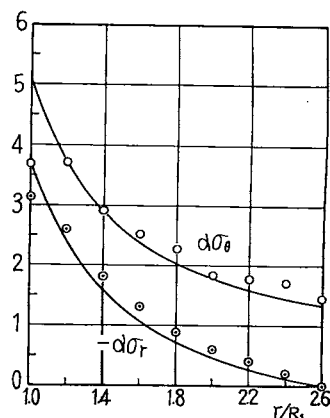
第 16 図 No. 1, $z/h=0.50$



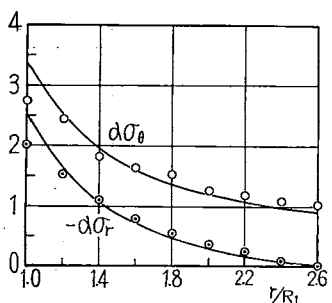
第 17 図 No. 1, $z/h=0.75$



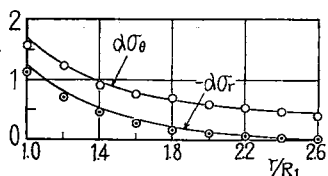
第 18 図 No. 2, $z/h=0$



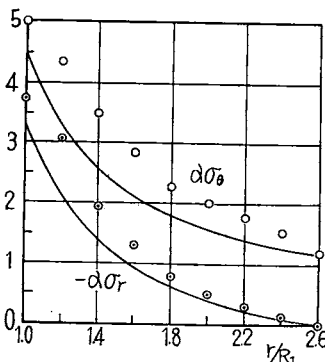
第 19 図 No. 2, $z/h=0.25$



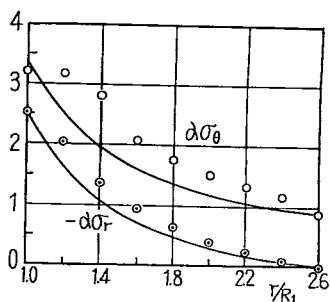
第 20 図 No. 2, $z/h=0.50$



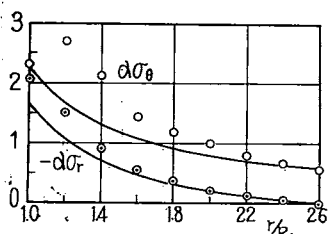
第 21 図 No. 2, $z/h=0.75$



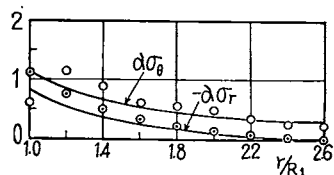
第 22 図 No. 3, $z/h=0$



第 23 図 No. 3, $z/h=0.25$



第 24 図 No. 3, $z/h=0.50$



第 25 図 No. 3, $z/h=0.75$

$=0.4$ 近くで符号は反転し、ピン押出しの場合の傾向を円筒下半部が示すに至っている。これら σ_z , τ_{rz} の最大値は、本場合の締めしろ ϵ が No. 1 の約 $4/3$ であることを考慮すれば No. 1 の場合よりも低下するものといえる。しかるに、ピン、円筒が同一材である No. 3 においては、圧入荷重除去による円筒ひずみの回復は、圧入接触ピンの変形回復と跳ね返りとの相対的関連性が複雑であるため、剛体ピンの No. 2 の場合のように単純な応力分布とはならず、その接触条件によってピンとの間に微細なすべりが幾個所かに発生し、圧入完了直後における応力分布に攪乱を誘起し、それがつりあった状態が荷重除去後における定常応力状態となっているものと考察されるのである。事実第 12, 13 図は正しくこれを示すもので、 σ_z , τ_{rz} とともに円筒の内周幾個所かの横断面でその作用方向の変転を来たしている状況となっている。かくてその大きさは σ_r , σ_θ について前記した点と異なり、No. 1 No. 2 の両場合よりは減少した結果となっていることは本供試品の締めしろ量を考慮しても明らかであるが、それらの特異な分布状態に本場合のはめあい応力の特徴があるといわねばならない。

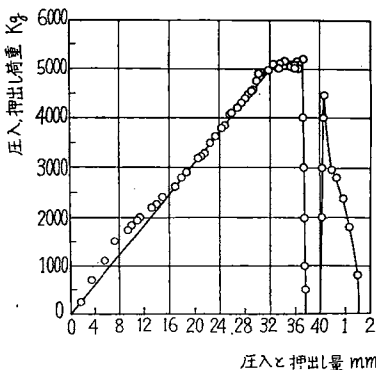
3. 鋼製模型による圧入実験

前節の三次元凍結光弾性解析結果によって求められた円筒の諸応力は、はめあいの条件が弾性域内にある場合の実用問題に適用しうる状況を示すものであることはもちろんである。しかし普通のピンはめあいにおいては円筒内周面は降伏に立ち至り、永久ひずみを生じている場合がきわめて多く、テーパピンの場合もその例外ではないはずである。よってここでは鋼製円筒を使用して前節と同様のテーパピンを圧入し、はめあいによる円筒の変形状況などのテーパによる影響程度を検討してみることにした。

第 3 表は供試模型の寸法を示すものであるが*、円筒の圧入端上面における最大締めしろはいずれも比較的多く、ピンの圧入はめあいによって円筒の大部分は塑性域に入るとは明りょうである。ピ

第 3 表 鋼製供試模型寸法

試片番号		I	II	II
各部寸法				
円筒	内径 $2R_1$ mm	15.089	15.092	15.089
	外径 $2R_2$ mm	39.005	38.976	38.947
	$m=R_2/R_1$	2.585	2.583	2.581
	高さ h mm	37.505	37.502	37.501
ピン	圧入高さ h' mm	36.95	37.14	37.33
	テーパ β %	1.763	2.103	2.372
締めしろ	最大値 δ mm	0.651	0.781	0.886
	$\epsilon=\delta/\epsilon R_1$ %	4.316	5.174	5.870



第 26 図 テーパピンの圧入と押出荷重 (No. III)

ン圧入に際しては円筒外周の上端部近く ($z/h=0.067$)、中央部 ($z/h=0.5$) および下端部近く ($z/h=0.933$) において、それぞれ 3 枚あての小形抵抗線ゲージを接着し、圧入過程とピンの押出し時におけるひずみ量を測定した。

第 26 図は圧入と押出し荷重の一例を No. III について示したものであり、第 27 図は各供試円筒外周における円周方向ひずみ ϵ_θ の圧入過程における増加状況を示している。図中○印は No. I, ×印は No. II, ⊙印は No. III を、また上方の実験点群より上端部、中央部および下端部における測定結果をそれぞれ鎖線、実線、破線で結んで表わすもので、いずれの供試片においてもテーパピンの圧入進行に伴ってはめ

* 円筒材の機械的性質は $\sigma_s=27.5$, $\sigma_B=42.5$, $\sigma_z=29.3$ kg/mm², $\delta=33.0$ %, $\psi=68.0$ %, $H_RB=69.8$ で、 σ_s の値は文献 1), 3) に示したテーパ穴円環に使用した板材のそれに等しい。

あいの影響が上端部より中央部へ、さらに下端部へと順次及んで行く状況、ならびにテーパの大小、すなわち締めしろ量の大小による影響程度の違いなどを明りように認めることができる。ここで圧入完了後に各横断面位置に生じている各円筒の ϵ_θ と圧入上端面における最大締めしろ δ mm との関係をみれば

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{\theta 1} &= (127.652 \delta - 28.461) \times 10^{-4} \\ \epsilon_{\theta 2} &= (98.543 \delta - 34.804) \times 10^{-4} \\ \epsilon_{\theta 3} &= (39.930 \delta - 22.252) \times 10^{-4} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

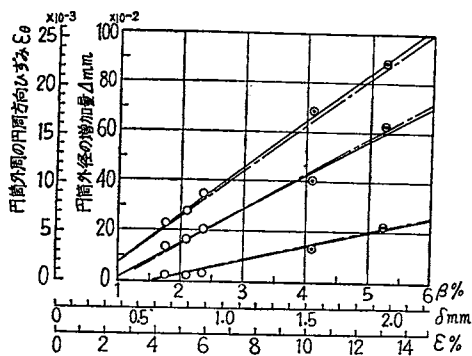
なる直線的増加傾向を持つものであることがわかる。ここで添え数字 1, 2, 3 はそれぞれ $z/h = 0.067, 0.5$ および 0.933 の部位を示すものである。さて円筒外周における上記 ϵ_θ は、また円筒外周の変形を示すものともいえ、外径の増加量 Δ mm は $\epsilon = \delta / 2 R_1 \%$ を用いてそれぞれ次式で与えられることになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= (7.468 \epsilon - 11.100) \times 10^{-2} \\ \Delta_2 &= (5.765 \epsilon - 13.574) \times 10^{-2} \\ \Delta_3 &= (2.336 \epsilon - 8.678) \times 10^{-2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

また本実験では円筒の圧入端上面穴周辺にはピンの圧入を円滑ならしめるよう僅かの丸味を最終的に与えたため、 ϵ とピンテーパ β とは $\beta = 0.4035 \epsilon$ の関係になっており、これを用いれば Δ は β でも表わしうることはもちろんである。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= (18.509 \beta - 11.100) \times 10^{-2} \\ \Delta_2 &= (14.289 \beta - 13.574) \times 10^{-2} \\ \Delta_3 &= (5.790 \beta - 8.678) \times 10^{-2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

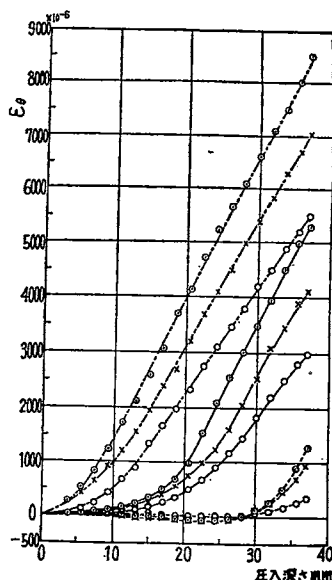
これらの結果を図示したのが第 28 図の鎖線であり、○印で各円筒の直径増加量の直接測定値が記入されている。



第 28 図 外周の上, 中および下部における円周方向ひずみ ϵ_θ と直径の増加量 Δ

れ得ないことを示すものである。なお図中に追加記入された Δ の各測定値は、もちろんひずみゲージ接着部位該当位置での結果である。

さて以上のように光弾性用アルルダイト供試円筒について Δ の実測値は、鋼製模型の ϵ_θ より求めた上記関係式にすべてよく一致することが明りようであるから、ここで実測 ϵ_θ のみならず各供試円筒に対する実測 Δ 値をもすべて含め、それらの β 、すなわち ϵ による変化関係式を再確認すれば次の



第 27 図 ピン圧入過程における円筒外周の円周方向ひずみ

入されている。図中上方より $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ であって、いずれも両者がよく一致する結果を示しているが、ここで前節の光弾性実験におけるピンも円筒材と同一のアルルダイトで作製された場合の No. 3 における Δ の測定結果を持ち出し、本図中の該当 $\beta (=4.136 \%)$ に対応させて○印で記入してみればよく上記直線上に乗ってくることを認められる。また、さらにピン材は真鍮棒である場合の No. 2 の結果も○印で $\beta = 5.250 \%$ の該当横軸位置に追記すれば、これも図から明らかなように同様一致することとなる。これらの事実はとりもなおさず、本実験のように ϵ の大きい場合にはピン自身の変形による影響は円筒外周にまで明確には現わ

ものとなり、第 28 図中の実線はこれを示すものである。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{\theta 1} &= (1.987 \epsilon - 3.042) \times 10^{-3} \\ \epsilon_{\theta 2} &= (1.434 \epsilon - 3.176) \times 10^{-3} \\ \epsilon_{\theta 3} &= (0.594 \epsilon - 2.332) \times 10^{-3} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= (7.749 \epsilon - 11.863) \times 10^{-2} \\ d_2 &= (5.593 \epsilon - 12.388) \times 10^{-2} \\ d_3 &= (2.317 \epsilon - 9.094) \times 10^{-2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

円筒の上，中，下部各位置における外径がテーパピンの圧入によってかかる変形を受けるため，円筒はピン圧入端より下端部に向って末すばかりの円すい形となるわけである。第 29 図は横軸に z/h をとり，任意締めしろ ϵ を与えるテーパピン圧入時における外径の変化状況を上式より求めて図示したものであり，さらに No. I および No. III の供試円筒についての z による d の詳細実測値を●印で記入し，これを鎖線で結んで示してある。これから明らかのように圧入上端面近傍では末すばかりの傾向は小さく，換言すれば外径拡大率は減少するのに対し， $z/h > 0.4$ すなわち円筒の下半 60 % 位の間ではほとんど完全な円すい状になって拡大が行われていることが認められる。この部分のテーパ β' は圧入ピンのテーパ β に支配されることはもちろんで

$$\beta' = 0.4996 \beta - 0.2027 \quad (6)$$

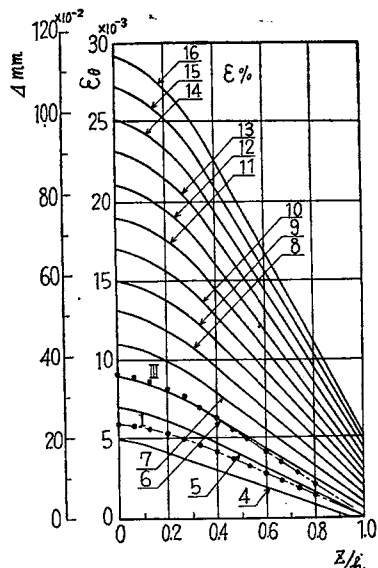
の関係となっている。すなわちピンテーパ β の約 50 % が円筒外周辺のテーパとなって現われるものである。なお ϵ の大きい場合ほど圧入上端部近くでの拡大率低下傾向は顕著であるが，少量締めしろの場合にはほとんど円筒全長にわたっての完全円すい状に変形することはもちろんである。第 30 図は供試各円筒の β' の値と (6) 式による結果 (実線) との比較を示すものであるが，微小締めしろ量の場合には外周テーパの発生をみるに至らないことは当然である。

次にピン圧入による円筒高さ h の変化 Δh は，円筒内径変化はピンとの締めしろ量にしたがい，また外径は上記の d_1, d_2 および d_3 の変化を持つ円すい状になるものと近似的にみなせば次式で表わされるはずである。

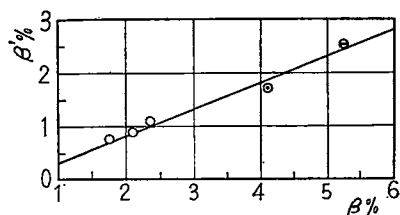
$$\Delta h/h = (m^2 - 1) / \{ (m^2 - 1) + m(d_1 + 2d_2 + d_3) / 4R_1 - (\epsilon/100) - (\epsilon/100)^2/3 \} - 1 \quad (7)$$

これに各供試円筒についての実測諸値を代入して求めた $\Delta h/h$ の結果は○印で第 31 図に示されており，また図中の●印は直接の測定値を示すもので，両者はほぼ一致する傾向にあることが認められる。なお (7) 式に (5) 式を代入すれば

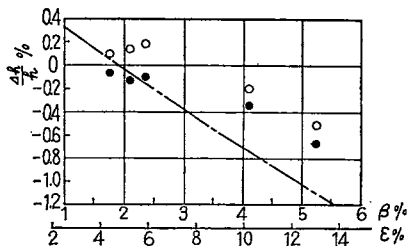
$$\Delta h/h = 5.76 / \{ 5.76 + (8.418 \epsilon - 39.635) \times 10^{-3} - (\epsilon/100)^2/3 \} - 1 \quad (8)$$



第 29 図 各種 ϵ を持つテーパピンの圧入による円筒外周辺の変形および No. I, III の変形実測結果



第 30 図 円筒外周のテーパ β'



第 31 図 円筒高さの変化

となり、本式による計算結果を示したのが図中の鎖線である。いずれにしてもテーパ、すなわち上端面における最大締めしろ量が少ない場合には円筒高さは増加するのに対し、テーパが大きく締めしろが増大した場合にはそれに応じて高さは減少するものであることは明りょうである。

以上により、テーパピンの圧入による円筒外径および高さなどの変形について検討したのであるが、最後にピンの押出しに伴う事項に触れておくこととする。すなわち圧入完了後、逆にピンを円筒より圧出離脱させるに必要な押出荷重は接触部が降伏域に入っていることから $P = 2\pi R_1 h p_0 \mu$ で与えられるものである。ここで接触圧力は $p_0 = \sigma_s \ln(R_2/R_1) = 26.3 \text{ kg/mm}^2$ で、摩擦係数 $\mu = 0.09^*$ として第 26 図に示した No. III に対する計算値を例示すれば $P = 4180 \text{ kg}$ となり、実験結果にほぼよく一致することが認められる。また押出しの際には円筒は弾性回復を行うが、外周における円周方向引張りひずみの回復量 ϵ_{θ}' は上端、中央、下端の位置による差は認められず、ともに

$$\epsilon_{\theta}' = (5.694 - 2.740 \delta) \times 10^{-4} \quad (9)$$

で与えられ、先に示した圧入時の値に比較すれば僅少であることはもちろんである。外周で測定される軸方向圧縮ひずみの回復量は上記 ϵ_{θ}' よりもさらに小さく、例えば No. III の上、中、下端部でそれぞれ 1.07×10^{-4} 、 0.65×10^{-4} および 0.53×10^{-4} に過ぎない状態で、塑性変形が大勢を占めていることは明りょうである。

なおテーパピンは円筒への圧入、押出しによってそのテーパ量をわずかではあるが低減させられることはもちろんで、押出し後のテーパ β'' は次式で表わされるものとなっている。

$$\beta'' = 0.9813 \beta \quad (10)$$

すなわちピンの太い部分ほど絞り加工を受け、圧入前のテーパ β の 98 % に塑性変形させられる結果となっている。

4. 結 び

円筒にテーパピンを圧入した場合、円筒に生ずる三次元応力ならびに変形の状態を凍結三次元弾性法と抵抗線ひずみゲージなどによる測定によって解析検討し、テーパピン圧入の条件による応力分布の変動とおおのこの場合の特徴、二次元的計算値との比較、圧入ピンのテーパ度合い、締めしろの大小による影響程度などを吟味した。すなわちピン圧入による半径方向と円周方向の垂直応力の大きさは、二次元応力の計算値と比較すれば、ピンが剛体とみなしうる場合で圧入完了直後には小さく、圧入荷重を除去すればほぼ一致する傾向になり、ピンも同一材で圧入荷重を除去した普通の場合では増大分布する注目すべき結果となることを指摘した。またこの際の軸方向垂直応力とせん断応力の大きさはいずれも小さいが、ピンとの相対すべり発生のため、位置によっての大きさと向きの変動が著しい特異な状態を呈すものであることを明らかにした。なお円筒に生ずる塑性変形については、外周辺の拡大に伴う外周テーパは圧入端近傍以外で大きく、かつ一様であって圧入ピンテーパの約 50 % に相当するものであり、また円筒高さの変化はピンテーパの小さい場合には増大するがテーパ値が大きくなれば逆に減少するものであることなどを、押出荷重の検討とともに吟味し、もってテーパピンの圧入はめあいに対する問題点を明らかにした。

最後に本研究の一部は文部省科学研究費によるものであり、供試片の作製と資料の整理などに尽力された川本久雄技官および光弾性実験に努力された佐藤秀紀、小久保吉次、堤谷理市郎の諸氏に心からの敬意と謝意を表するものであることを付記する。

* 文献1), 3)による。

参 考 文 献

- 1) 柴 原 正 雄：テーパ穴のはめあいについて（第1報），日本機械学会講演前刷集，No. 81（第40期全国大会，昭37—10），65.
- 2) 柴 原 正 雄：テーパ穴のはめあいについて（第2報），日本機械学会講演前刷集，No. 84（第40期通常総会，昭38—4），21.
- 3) 柴 原 正 雄：ローラチェーンにおけるリンクとピン，ブシュのはめあい強さ，機械の研究，16巻11号（昭39—11），16巻12号（昭39—12）掲載予定.
- 4) 国 尾 武：軸対称応力解析の光弾性的手法，日本機械学会誌，64巻507号（昭36—4），573.

（昭和39年9月15日受付）