金属材料の力学的挙動に及ぼす静水圧の影響*

西原 正夫** 田中吉之助*** 西原 守**** 村松隆男**

Effect of Hydrostatic Pressure on Mechanical Behaviour of Metallic Materials

by

Masao NISHIHARA, Kichinosuke TANAKA,

(Faculty of Engineering, Doshisha University) (Faculty of Engineering, Kyoto University)

Mamoru NISHIHARA and Takao MURAMATSU

(Kobe Steel Works) (Faculty of Engineering, Doshisha University)

For the study of the effect of hydrostatic pressure on mechanical behaviour of metals and alloys, a tri-axial testing machine was designed and constructed. The machine was designed to carry out tension and compression testing under the confining pressure up to 5 000 kg/cm² at room temperature.

Tension tests on Zinc, Aluminium, Titanium, Zirconium and Mg-Al Alloy were made under confining pressure.

The effects of hydrostatic pressure on ductility, for example, elongation and reduction in area were observed.

(Received Oct. 7, 1963)

1 緒 言

静水圧が材料の力学的挙動におよぼす影響については、古くから多くの人々によって研究されている。高静水圧下の実験は金属材料についても最近再び行なわれるようになった。

静水圧は金属材料については、従来、降伏条件に第一近似として影響を及ぼさないとして、多くの問題が¹⁾扱われ、これを裏付ける実験事実も P.W. Bridgman²⁾のほかにより示されている。これに反して、S.I. Ratner³⁾は、静水圧が応力とひずみの関係にかなり影響を与えることを実験的に示しており、また H.L.D. Pugh⁴⁾らも各種の金属材料について静水圧下で引張りおよびねじり試験を行なっているが、その結果は必ずしも Bridgman の結論とは一致していない。

実際に各種の金属材料の力学挙動に及ぼす静水圧の影響を検討するために、一種の三軸応力試験装置を試作した。これは最高 5 000 kg/cm² までの静水圧下で引張試験および圧縮試験を行ない得るものである。本報告は試験装置、実験方法および引張試験結果の概要である。

2 実験装置および実験方法

三軸応力試験の方法および試験機には種々あるが、本研究はある応力状態に高静水圧(応力の等方成分)を重ね合せた場合に、材料の力学的挙動にどのような変化を与えるかを明らかにするために、一種の三軸応力試験装置を試作し、各種の金属材料について実験を行なったものである。

試験装置は設計製作の容易なこと、および試験操作の安全なこと等のため R.O. Breadthauer⁴⁾らの用いた方法に変更改良を加えたものを試作した。この試験装置は一種の増圧機であって、吐出圧の比較的低いポンプによって試験片を装着した高圧シリンダ内に 5 000 kg/cm² までの高静水圧を発生させることができるものである。このようにして、高圧シリンダ内で等方的に圧縮された状態で、さらに試験片軸方向に荷重を加えると $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (引張試験)、または $\sigma_3 < \sigma_2 = \sigma_1$ (圧縮試験) の応力状態が実現される。その構造の概略は Fig. 1 に示したとおりであり、試験片 S に高静水圧を与えるには、低圧シリンダ C₂ に圧縮空気により作動する油ポンプによって一定圧の油を送り込み、ピストン P₂ を高圧シリンダ C₁ 内に押し込む。ピストン P₂ の低圧側および高圧側の面積比にしたがって増圧されるが、本装置においては増圧比は 1 : 16 である。高圧シリンダ内の油圧は高圧シリンダに取り付けたブルドン管圧力計によって計測される。高圧シリンダ C₁ には、同じ直径のピストン P₁ と P₂ があり、これらは圧板 L₁、連結棒 R₁ および圧板 L₃ によって連結

* 原稿受付 昭和38年10月7日、日本材料試験協会第11期(昭37... 5.8), 日本材料学会第12期(昭38.5.11) 講演会にて講演

** 正員 同志社大学工学部

*** 正員 京都大学工学部

**** 正員 株式会社神戸製鋼所

されているため、ピストン P_2 の圧入に応じた高静水圧を発生させることになる。

次に、このような高静水圧が加えられた状態で、本装置を万能試験機で圧縮すれば、圧板 L_1 が下りピストン P_1 が押し下げられて試験片 S に軸方向の引張りまたは圧縮荷重が加えられる。ピストン P_1 が圧入されただけピストン P_2 は押し出されることにより、試

験片の体積変化および高圧シリンダの変形を無視すれば、静水圧は一定と考えられる。

引張試験を行なう場合の応力状態の変化は、高静水圧が加えられた状態では三軸等方圧縮 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (静水圧) であるが、軸方向の荷重を加えていくと、試験片の軸方向の圧縮応力は次第に減少して 0 となり、次いで引張応力を生ずるようになる。なお、計力機の指示する荷重は軸方向の応力に対応した荷重をそのまま与えるものではなく、主応力差に相当した荷重に、ピストンと高圧シリンダ間の摩擦力を加えたものである。上に述べた摩擦力は静水圧の関数であるが、ある静水圧の下で必ずしも一定ではない。この摩擦力は試験片を装着しないで実験を行なうことによって計測し、この値を計力機に指示された荷重値より差し引いた。

ひずみの計測はピストン P_1 の変位をダイヤルゲージで計測し、同時に差動変圧器式伸び計による自記記録も行なった。また、圧力媒体には少なくとも 5000 kg/cm² までは凍結しないホワイトスピンドル油を用いた。

3 試験材および試験片形状寸法

試験に供した材料は亜鉛(鋳造)、アルミニウム、チタニウム、ジルコニウム、Mg-Al 合金の 5 種類の金属および合金を用い、これらの化学成分を Table I に示す。アルミニウムは機械加工後 400°C 1 時間焼鈍後、その他の材料は機械加工のまま実験に供した。試験片の形状寸法は Fig. 2 に示すような一端を閉じた中空状試験片で、試験片底部を押すことによって軸方向の荷重が加えられ得るものである。中空状試験片の内外に同一の静水圧を受ける場合には、その応力状態はあまり厚肉でない限り中実試験片を試験する場合と同じと考えることができる。

4 実験結果と考察

種々の静水圧下で引張試験を行なった後の試験片を

Fig. 1 Testing apparatus

Table I Chemical composition of materials tested (%)

Material	H ₂	O ₂	N ₂	Si	Fe	C	Hf	Zr	
Zirconium	0.0043	0.051	0.002	0.005	0.083	0.008	0.40	Balance	
Titanium	H ₂ 0.015	O ₂ 0.078	N ₂ 0.035	Si 0.017	Fe 0.050	C 0.01	Ti Balance		
Aluminium	Cu 1.11	Mg 0.24	Mn 0.14	Fe 0.55	Si 0.28	Zn 0.16	Cr 0.02	Ti 0.01	Al Balance
Zinc	Pb 0.0008	Cd 0.098	Fe 0.001	Sn <0.001	Zn Balance				
Mg-Al Alloy	Al 0.87	Be 0.008	Si 0.003	Fe 0.006	Cu 0.0003	Mg Balance			

Fig. 3に示す。これより、静水圧が変形の特長および状態に著しく影響をおよぼす材料と、そうでないものがあるように思われる。

亜鉛、アルミニウム、チタニウム、ジルコニウム、Mg-Al合金の引張試験結果を応力-ひずみ線図としてそれぞれ Figs. 4, 5, 6, 7, 8に示す。縦軸を主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kg/mm²)、横軸をひずみ ϵ (%) で表わしたものである。静水圧の増加に伴う亜鉛の伸びの増大は著しいが、アルミニウムの伸びは静水圧の影響をあまり受けないようであり、このような傾向はチタニウム、ジルコニウム、Mg-Al合金においても認められる。

亜鉛およびアルミニウムの試験片のあるものには、フォトグレイティングをほどこして、試験片軸方向の伸びおよびその分布を測定し、他方、圧力容器の外側でダイヤルゲージによって測定した伸びの値との比較を行なった。Fig. 9は静水圧と伸びの関係を示したものである。この図よりフォトグレイティング法により求めた破断伸びと、間接的にダイヤルゲージで測定した伸びの値はほぼ一致しており、このことは容器の外側で間接的にダイヤルゲージによって伸びの測定を行なってもよいことを示している。また同図より、アルミニウムの破断伸びは19~23%、一般伸びは10~13%の範囲にあり、前者は後者の約2倍であるが、いずれも静水圧による変化はあまり認められない。亜鉛については、常圧における一般伸びは1%であるのに対して、1800 kg/cm²の下では5%と明らかに増大しているが、この場合の破断伸びは30~40%で、一般伸びに比較すると著しく大であり、破断伸びの大部分は局部的な伸びによるものである。

一般の三軸応力状態における応力解析を行なうには、破断伸びおよびその内の一般伸びが、静水圧によってどのように影響されるかを明らかにしなければならないが、実験結果によると、伸びの大部分は局部的な伸びによるものであって、変形は一様ではない。このことは、この種の実験によって得られた主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸方向のひずみ (ϵ) との関係曲線を用いて一般の応力解析を行なうのに、大きな制限があることを意味している。

静水圧下の材料の変形能を研究するには絞りもまた重要である。Fig. 10は静水圧と絞りの関係を示した

Fig. 2 Specimen for tension test

Fig. 3 Tested specimens under various confining pressures

ものであり、図中の破線ならびに一点鎖線はアルミニウム(引抜材)および亜鉛(引抜材)について National Engineering Laboratory (N.E.L.) の Pugh らの結果を引用したものである。伸びの場合と同様に絞りもまた静水圧の増加と共に増大する。ことに亜鉛における増加は異常に大であって、低圧下における著しい脆性から高圧下における延性への転移は、ある狭い圧力領域において急激に起こる。このことは、試験材の化学成分や製法が異なるにもかかわらず N.E.L. の Pugh

らが得た実験結果とよく一致している。この転移圧力は約 1000 kg/cm^2 である。これに反して、常圧においてもかなり延性の高いアルミニウムについては、絞りの増加は亜鉛ほど著しくないが、約 3000 kg/cm^2 以上の静水圧においてはほとんど 100% に達する。またチタニウム、ジルコニウムおよび Mg-Al 合金の絞りの増加は比較的小さい。Fig. 11 は試験後の試験片の縦断面を示したものであるが、亜鉛の場合、常圧時にはほとんど変形を伴わない脆性破壊であるが、 1030 kg/cm^2 では大きな変形をし、その破断面は刃状を呈

Fig. 4 Stress strain curves of Zinc

Fig. 5 Stress strain curves of Aluminum

Fig. 6 Stress strain curves of Titanium

Fig. 7 Stress strain curves of Zirconium

Fig. 8 Stress strain curves of Mg-Al Alloy

し、著しく大きい絞りを示している。またアルミニウムの局部伸びおよび絞りがきわめて大きいことも明らかである。チタニウムとジルコニウムは異常な変形特性を有している。すなわち、Fig. 11 でも認められるように、伸びの増大につれて試験片中央部は内外径共に縮小し、全体として絞られる。この現象は常圧下の試験においても認められ、両材は、Fig. 2 に示す試験片の内径寸法を 8 mm ϕ に変更して実験を行なった。

応力-ひずみ曲線から求めた主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) および軸応力 (σ_1) の最大値の静水圧による変化を Fig. 12

Fig. 9 Effect of pressure on elongation at fracture

Fig. 10 Effect of pressure on reduction in area at fracture

Fig. 11 Longitudinal section of tested specimens

に示す。一般に主応力差の最大値は静水圧と共に増大するが、逆に軸応力の最大値は減少する。材料によって異なるが、ある静水圧以上においては、軸応力 (σ_1) が引張応力となることなく圧縮応力の領域内で最大値に達し破断に至る。

Figs. 13, 14, 15 に亜鉛、アルミニウムおよびチタニウムのモールの応力円を示す。これらは最大応力および種々のひずみ量に対するモールの応力円を描き、これに包絡線を引いたものである。本実験に供した材料はいずれも明りょうな降伏現象が認められず、また加工硬化曲線は Mg-Al 合金を除けば、ほぼ水平であるため、降伏点応力に対する応力円の代りに最大応力

Fig. 12 Effect of pressure on maximum stress

Fig. 13 Mohr's diagram for Zinc

Fig. 14 Mohr's diagram for Aluminium

に対するものを描いた。これらの包絡線は亜鉛の場合を例外とすれば、 σ 軸にほぼ水平ないしは多少の傾斜をもっている。

5 結 言

材料の力学的挙動におよぼす静水圧の影響を明らかにするために、一種の三軸応力試験装置を試作した。本装置は常温において、 5000 kg/cm^2 までの静水圧の下で引張試験および圧縮試験を行ない得るものである。

静水圧が $0 \sim 4250 \text{ kg/cm}^2$ の下で亜鉛、アルミニウム、チタニウム、ジルコニウム、Mg-Al 合金の引張

試験を行ない、金属材料の力学的挙動、たとえば破断伸び、絞り等の延性は静水圧の増加と共に増大し、伸びの増加の大部分は局部伸びであることが認められた。ことに亜鉛については、静水圧の影響は異常に大きく、約 1000 kg/cm^2 を境として、脆性から延性への著しい転移を示す。

なお、本装置を用いて数種の岩石の圧縮試験も行なったが、従来報告されているものとほぼ同様な結果を得ることができた。

目下、高圧容器内で試験片に加えられる荷重および変形を直接測定することを試みているので、これらについては結果を得た上で報告したいと思う。

参 考 文 献

- 1) Bridgman, P.W., J. Appl. Phys., 24, 560 (1953).
- 2) Ratner, S.I., Z. Tekh. Fiz. USSR, 19, 408 (1949).
- 3) Pugh, H.L.D., and D. Green, N.E.L. Plasticity Report No. 128 (1956).
- 4) Breadthauer, R.O., Trans. ASME, 79, 695 (1957).

Fig. 15 Mohr's diagram for Titanium