内圧厚肉円筒クリープおよび残留応力測定について*

平 修 二** 小寺沢良一** 大谷隆一**

Creep of Thick-Walled Cylinders under Internal Pressure at High Temperature, and Measurement of Residual Stresses

by

Shuji TAIRA, Ryoichi KOTERAZAWA and Ryuichi OHTANI

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

In recent years so much attention has been called to the problem of creep or creep rupture in pressure vessels and tubes that operate at high temperature, and numerous theoretical and experimental works on this problem have hitherto been reported. There are, however, several open questions that must be discussed from the standpoint of multiaxial creep behaviors.

The authors have taken interest in this subject and have been carrying out the creep tests of thick-walled cylinders under internal pressure at high temperature. The tests have been made with 0.19 % carbon steel at the temperature of 450°C. The tubular specimens had a 400 mm cylindrical gauge length, with the outside diameter about 50.45 mm and the ratio 2 of outside to inside diameter (OD/ID). The specimens of uniaxial creep tests were cut from the same tubes. The internal pressure was supplied by the hand-operated water-pump and was maintained within $\pm 1\%$ by the pressure controller. The circumferential elongation on the outside diameter of the tubular specimen was measured by dial gauges and mirror-telescope instruments.

The results of the tests revealed that the circumferential strain on the outside diameter versus the time relations for the tubular specimens were similar as the strain versus the time relations for the uniaxial tension. The axial creep for the tubular specimens was negligible.

In addition to this, this report deals with the results of the measurement of residual stress distributions in the thick-walled cylinders after the creep tests. The measurement was carried out by the well-known Sachs' method. The X-ray method was also used for the residual stress determinations on the outer surface of the cylinder, and a fairly good agreement was obtained between the stress values measured by the two methods.

The results obtained were as follows: No residual stress in the cylinder before the creep tests can be measured except near the outer and inner surfaces. The residual stress distributions after the creep tests under 1 000 kg/cm² for 1 hour are similar as those under 1 200 kg/cm² for 104 hours; that is, the circumferential and axial residual stresses change monotonously from compression on the inner surface to the tension on the outer surface, and the radial residual stress, which is smaller than the others, is compressive in the wall. The stress distributions in creep conditions determined by these measured residual stresses correspond to the steadystate stress distributions. It was also found that the circumferential and axial residual stresses measured by means of X-rays remained constant on the surface of the cylinders after the creep tests under 1 000 kg/cm² for 1, 10 and 100 hours respectively.

From these results it is found that, as far as the creep of the cylinders at 450 °C under 1 000 kg/cm² is concerned, the stress distributions change from the initial elastic state to a steady state in a short time. It is the authors' belief that the time required for the stress distributions almost to reach the steady state will be relatively short in the case of creep at high temperature and high stress.

However, further discussions on a transient stage will be necessary from the point of view of multiaxial creep theory.

(Received Dec. 4, 1963)

1 緒 言

最近、わが国においても、高温用機械装置の著しい進歩に伴う実際上の要求と、高温強度問題に関する

研究の発展に応じて、多軸応力下の高温強度研究に対する関心が高まりつつある。筆者らはこのような研究のすう勢に応じて、これまで引張ねじり組み合せ¹⁾応力下のクリープについて研究を行なってきたが、さらに、多軸応力下のクリープの代表的な一例であり、実用面への応用としても重要なものである、内圧厚肉

* 原稿受理 昭和38年12月4日

** 正員 京都大学工学部機械 京都市左京区吉田本町

円筒のクリープに関する研究を実施している。ここでは、炭素鋼厚肉円筒試験片に一定内圧を与えた場合のクリープ試験結果について述べると共に、厚肉円筒の残留応力を測定して、その結果に基づいて円筒のクリープ中の応力分布について検討した結果を報告する。

2 試験装置および試験方法

内圧厚肉円筒クリープ試験に使用した装置の説明図を Fig. 1 に示す。この装置は、Kooistra²⁾らの内圧

Fig. 1. Schematic diagram of creep testing apparatus on tubular specimens under internal pressure

円筒クリープ破断試験におけるものと同様の原理によるものであって、この方式は世界的に最も広く用いられており、手動式水圧ポンプによって円筒試験片およびリザーバーの内部に高圧水を封入し、リザーバーの温度を調節することによって圧力調節を行なうものである。

リザーバーは厚肉鋼管の両端をバックアップリングをそえたOリングで閉鎖したものである。これは、円筒試験片のクリープに伴う圧力低下を緩和するものであると共に、抵抗線ひずみ計式の圧力検出ヘッドと零点方式の圧力調節器によって、リザーバーのはいっている温水槽内の水温を変化させ、それに伴うリザーバー内の高圧水の圧力変化を利用して圧力の調節を行なうものである。この原理によって試験片の破壊直前をのぞいては±1%以内の範囲で圧力一定に保ち得る。

試験片の加熱には円筒形横型の電気炉を用いている。円筒試験片の軸方向温度分布は、Fig. 2 に示すように、試験片のほぼ全長にわたって±1℃の範囲にはいっている。一方、試験片の管壁断面における半径方向の温度差はないことが認められた。

円筒試験片の変形測定法としては Fig. 1 に示すように、ステンレス鋼棒を炉の左右両側面より炉内の円筒試験片の外面に押しあて、試験片の外径の変化を1/100mmダイヤルゲージと鏡および望遠鏡装置によって読む方法を採用している。測定精度に関しては、

Fig. 2. Temperature gradient at 450°C on tubular specimen

実験途中あるいは実験終了後に試験片を取り出して、直接マイクロメータによって測定した値と比較を行っているが、充分信頼できるものであることを確認している。

3 試験材料および試験片

本実験の供試材は、外径50.45mm、内外径比約1:2の0.19%炭素鋼ボイラ用厚肉鋼管であって、その化学成分、熱処理を Table I に、常温における機械的性質を Table II に示す。

Fig. 3 は本実験に使用した円筒試験片の形状寸法

Table I. Chemical composition and condition of heat treatment

Composition	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Fe
(%)	0.19	0.28	0.55	0.017	0.008	0.12	0.07	0.07	0.02	Bal.

Heated at 920°C for 1hr, cooling in furnace

Table II. Mechanical properties at room temperature

Yield point (kg/mm ²)	30.4
Tensile strength (kg/mm ²)	46.2
Elongation (%)	32.7
Reduction of area (%)	69.8

Fig. 3. Tubular specimen

を示したものである。試験片の破裂の際の爆発力ができるかぎり小さくするために、内部に丸棒中子を挿入し、両端は溶接して閉鎖している。なお、内圧円筒のクリープ試験結果と単純引張クリープ試験結果の関連性を検討するために、内圧試験に使用したものと同一の炭素鋼管から直径5mm、標点距離30mmの試験片を採取して、これについて引張クリープ試験を行なった。

4 試験結果

試験温度 450°C において、荷重一定下の単純引張クリープ試験、および内圧一定下の円筒クリープ試験を行なった。Fig. 4 および 5 はそれぞれの実験結果を

Fig. 4. Strain versus time for uniaxial tension creep tests

Fig. 5. Circumferential strain on outside diameter versus time for creep tests on tubular specimens

クリープ曲線に示したものである。内圧円筒クリープ曲線については、縦軸に外径ひずみ（外面における接線ひずみ）をとって表わしている。これら両線図より、クリープ曲線の形については内圧円筒の場合も単純引張の場合と大差なく、遷移クリープ、定常クリープ、第三期クリープの各領域の存在することが認められる。

一方、両者の実験結果を、単純引張クリープについてはひずみ—ひずみ速度、内圧円筒クリープについては外径ひずみ—外径ひずみ速度の両対数線図に表わしたものが Fig. 6 である。この線図からも単純引張と内圧円筒のクリープにおいて、ひずみとひずみ速度の間に同様な関係があることがわかる。また、この図においては、単純引張、内圧円筒クリープ共にひずみ速度が最小となるひずみの範囲の小さいことが示されている。Fig. 7 は、内圧円筒クリープの実験結果をデザイン・データ・ダイアグラムに示したものである。パラメータとしては、外径ひずみがそれぞれ 0.2, 0.5, 1.0, 5.0% の場合、および破断の場合についてとっている。

なお、円筒の軸方向の変形については、実験終了後の試験片の両端面間距離を測定することによって検討しているが、その結果、ほとんど軸方向ひずみは認められなかった。なかには外径クリープひずみの約 5%

Fig. 6. Strain versus strain rate for uniaxial tension creep tests and strain versus strain rate on outside diameter for creep tests on tubular specimens

Fig. 7. Design data diagram for creep tests on tubular specimens under internal pressure

程度の伸びが認められたものもあるが、これらは接線方向の変形と比較して非常に小さいため、軸方向の変形は無視してよいと思われる。

5 円筒の残留応力測定

内圧厚肉円筒クリープの変形機構ならびに破壊因子を明らかにする上において、きわめて重要な問題の一つに、厚肉円筒のクリープ中の応力分布に関する問題がある。一方、多軸応力下のクリープに関する理論解析は、Bailey 以来多くの研究者によってなされ、その結果多種多様な解析方法が提案されてきているが、これら諸理論の妥当性についてはまだ不明な点が多く残されている。筆者らは、これらの問題点を明らかにするために、本クリープ試験に使用した厚肉円筒試験片について内周削りの Sachs 法および X 線測定法によって残留応力を測定し、その結果に基づいて厚肉円筒のクリープ中の応力分布を検討している。

5.1 測定方法

測定試料は内圧厚肉円筒クリープ試験片の中央部か

ら長さ120~150mmに切り取ったものである。

Sachs 法による場合には、円筒試料の外周中央部の接線方向と軸方向に抵抗線ひずみ計をそれぞれ二組対称にはり、切削によって内面を除去し、その度にひずみを測定している。切削による影響をできるかぎりなくするために、切削時の試料の温度上昇は 20°C 以下におさえている。また、試料と同材、同寸法の円筒の外周にはたがえを温度補正用ゲージとし、試料ゲージと共にその表面をワックスでおおって、ひずみ測定の際には両者を共に水中に入れて一定温度下に保持している。

また、円筒試料の外周における接線方向および軸方向の残留応力をX線によって測定した。使用したX線装置はGM計数管を用いた自動記録式平行ビーム型ひずみ測定装置であって、クロムの対陰極を用いて、(211)面回折線を得、 $\sin^2\psi$ 法で測定した。試料は固定して測定し、数箇所の測定値を平均したが、個々のばらつきは無視し得る程度のものであった。また、円筒の軸の回りに回転数約1c/sで試料を回転させて測定を試みた場合には、固定して測定した場合よりも比較的一様な回折線が得られたが、残留応力の測定値は固定して求めたものと差は認められなかった。

5・2 測定結果と考察

Sachs 法によって得られた残留応力の測定結果をFig. 8, 9 および10の太線で示す。実線、破線、一点鎖線で示された曲線がそれぞれ接線、軸、半径残留応力分布を表わす。Fig. 8 は処女材の円筒材料 (450°C において約15hr保持したもので、クリープ試験直前の状態) についての結果であり、Fig. 9 および10は、 $p=1000\text{kg/cm}^2$ で1hr および $p=1200\text{kg/cm}^2$ で104hr 内圧クリープ試験を行なった後のものである。これらのうち、たとえば $p=1000\text{kg/cm}^2$, 1hr クリープ試験後の試料について測定されたひずみの変化と除去断面面積の関係を示すと Fig. 11 のようである。二つの試料より得られた測定結果はきわめてよく一致しており、本測定の再現性は充分あるものと思われる。

Fig. 8. Residual stresses of a thick-walled cylinder measured by Sachs, and X-ray methods

Fig. 9. Residual stresses of a thick-walled cylinder measured by Sachs' and X-ray methods and comparison with calculated values obtained from Eqs. (2) and (3)

Fig. 10. Residual stresses of a thick-walled cylinder measured by Sachs' and X-ray methods and comparison with calculated values obtained from Eqs. (2) and (3)

Fig. 11. The resultant circumferential and axial strain of cylinders after creep test at 450°C for 1 hr and 1000kg/cm^2 by removal of the inner layer

クリープ試験前の円筒については、Fig. 8 に示したように、内面において 4kg/cm^2 程度の圧縮接線および軸残留応力が生じており、内部ではほとんど零となっている。クリープ試験後のものについては、Fig. 9 に示した $p=1000\text{kg/cm}^2$ 、1hr クリープ後の場合、Fig. 10 に示した $p=1200\text{kg/cm}^2$ 、104hr クリープ後の場合共に同様な傾向を呈している。すなわち、接線および軸残留応力は内面で圧縮となり、外面に向って単調に減少し、その後引張りに転じている。半径残留応力は内表面において零であり、内部でわずかに圧縮となっている。なお、Fig. 8, 9 および10における、白丸および黒丸印は、X線測定法によって得られた円筒外面の接線および軸残留応力の測定値である。接線および軸残留応力を σ_t 、および σ_z とすると、残留応力の平衡条件は

$$\int_{r_i}^{r_o} \sigma_t dr = 0, \quad \int_{r_i}^{r_o} \sigma_z \cdot r \cdot dr = 0 \quad (1)$$

ただし、 r : 円筒の任意半径

r_i, r_o : 円筒の内外半径

である。(1)式に基づいて、Sachs 法による残留応力分布の測定結果を円筒の外表面まで単調に外挿すれば、X線による測定値とほぼ一致するようである。ただし、Fig. 8 の処女材における軸残留応力 および $p=1200\text{kg/cm}^2$ の場合の残留応力については一致せず、X線による値が少し小さ目に出ている。

以上の結果より明らかなように、内圧厚肉円筒のクリープ後の残留応力分布は、接線残留応力が最も大きく変化し、内面から外面に向かって圧縮から引張りに転じている。軸残留応力は接線残留応力とほぼ同様な分布をなしているが、値は接線残留応力よりも少し小さい。半径残留応力は三者のうち最も小さく、円筒内部においてわずかな圧縮応力となっていることが認められる。

これらの結果においてさらに興味ある点は、Fig. 9 に見られるように 450°C 、 $p=1000\text{kg/cm}^2$ において1hr クリープ試験を行なった後の円筒には、断面全体にわたってかなりの残留応力が生じていることである。この場合の残留応力分布は、Fig. 10 に示した $p=1200\text{kg/cm}^2$ 、104hr クリープ後の円筒のそれらと全く同様な傾向を示している。このことから、円筒内の応力分布の変化はクリープのごく初期において生じ、かなり短時間のうちに弾性応力分布から定常応力分布に収束するものと予想される。

Table III は、同厚肉円筒についてクリープ試験前およびクリープ試験後 1hr、10hr および100hr の場合の円筒外面における接線および軸残留応力を CrK α 線を用いて測定した結果を示したものである。クリープ試験1hr後には 5.9kg/cm^2 の接線残留応力および 1.4

Table III. Circumferential and axial residual stresses measured by CrK α (211) radiation on the surface of a 0.19% carbon steel cylinder before and after creep tests at 450°C under internal pressure 1000kg/cm^2

	Before creep test	After creep test		
Loading time (hr)	0	1	10	100
Circumferential creep strain on outside diameter (%)	0	0.04	0.07	0.12
Circumferential residual stress : σ_t (kg/mm^2)	0.8	5.9	5.9	6.0
Axial residual stress : σ_z (kg/mm^2)	0	1.4	1.4	1.4

kg/cm^2 の軸残留応力を生じており、100hr 後の場合もこれらの値は変わらず、ほとんど一定である。この結果からも、 450°C 、 $p=1000\text{kg/cm}^2$ においてはほぼ1hr以内弾性応力から定常応力に接近していることが認められる。

多軸クリープ理論に基づいて解析を行なえば、遷移クリープ領域においてクリープ中の定常応力分布は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= p \frac{[2/\alpha - 1] (r_o/r)^{2/\alpha} + 1}{(r_o/r_i)^{2/\alpha} - 1} \\ \sigma_z &= p \frac{[1/\alpha - 1] (r_o/r)^{2/\alpha} + 1}{(r_o/r_i)^{2/\alpha} - 1} \\ \sigma_r &= -p \frac{(r_o/r)^{2/\alpha} - 1}{(r_o/r_i)^{2/\alpha} - 1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 α は単純引張クリープの遷移クリープ領域における応力 σ とひずみ ϵ 、時間 t の間に

$$\epsilon = a \sigma^\alpha t^n$$

なる関係式が成り立つものとした場合の応力指数である。温度と材料による定数である。本実験における単純引張クリープ試験結果より得られた $\alpha = 4.17$ を用いて、(2)式で表わされる各応力を計算すれば、Fig. 12 の実線のようになる。一方、円筒の弾性応力分布は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= p \frac{(r_o/r)^2 + 1}{(r_o/r_i)^2 - 1} \\ \sigma_z &= p \frac{1}{(r_o/r_i)^2 - 1} \\ \sigma_r &= -p \frac{(r_o/r)^2 - 1}{(r_o/r_i)^2 - 1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

なる式で与えられ、この計算結果は Fig. 12 の破線で示されている。(2)式で与えられるクリープ中の各応力成分から(3)式の弾性応力成分を引いて得られる値を理論的な残留応力値として、これらを Fig. 9 および10においてそれぞれ細い実線、破線および一点鎖線で示している。両図においてこれらを測定結果と比較する

Fig. 12. Stress distribution in thick-walled cylinders under elastic and creep conditions

と良く一致していることが認められる。また $p=1000 \text{ kg/cm}^2$ における円筒外面の接線および軸残留応力の理論値は、それぞれ $\sigma_t=5.4 \text{ kg/mm}^2$ $\sigma_z=2.8 \text{ kg/mm}^2$ であって、これらは Table III に示されたX線による測定値とかなりよく一致している。

以上の結果より、本研究における内圧厚肉円筒のクリープにおいては、応力非定常な遷移クリープ現象は比較的初期において生じ、荷重負荷後、短時間内に弾性応力分布から(2)式で表わされるような定常応力分布に達するものと考えられる。

Coffin らは内圧厚肉円筒 (12Cr 鋼, 850°F , 12000 psi) の遷移クリープについて解析を行ない、その結果弾性応力から定常応力状態に達するまでに 1000 hr 以上の時間を要し、応力分布はかなり緩和な変化をすることを示している。この点については、筆者らが残留応力の立場から検討を行なった上述の結果に反するものである。この相異はおもに、理論解析の方法に問題点があるためと考えられ、応力非定常下の多軸クリープに関する理論解析の方法についてはなお検討を要する問題が残されている。

6 結 言

0.19%炭素鋼の厚肉円筒について、温度 450°C において内圧クリープ試験を行ない、その結果を示した。

また、クリープ試験に使用した厚肉円筒試験片の残留応力測定を行ない、クリープ中の厚肉円筒の応力分布について検討を加えた。以上より次のことが結論される。

(1) 内圧円筒クリープ曲線の形は単純引張りの場合と大差ない。

(2) 円筒試験片の軸方向のクリープ変形は接線クリープひずみと比較して無視し得る。

(3) 内圧 1000 kg/cm^2 で 1 hr クリープ試験を行なった後の円筒には、すでにかなりの残留応力が生じており、その分布は内圧 1200 kg/cm^2 , 104 hr クリープ試験後の円筒における残留応力分布と類似したものである。これらの測定結果と、クリープ中の定常応力より弾性応力を差し引いて得た残留応力分布の理論値とを比較すると、両者は非常によく一致している。

(4) 内圧 1000 kg/cm^2 でクリープ試験を行なった円筒の外面上における軸残留応力については、 1 hr クリープ後の値も 10 hr 、あるいは 100 hr クリープ後の値と変わらず、一定である。

(5) 以上のことより、本実験におけるように、比較的高温高圧下の内圧厚肉円筒のクリープにおいては、応力分布の変化はごく初期に生じ、比較的短時間内に定常応力状態に収束するものと思われる。

終りに本研究を行なうにあたり、試験用材料の提与を受けた住友金属工業株式会社に対して謝意を表する。
(昭和38年10月8日、当学会第6回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 平修二, 小寺沢良一, 安藤正男, 材料, **12**, 154 (1963).
- 2) Kooistra, L.F., R.U. Blaser, and Jr. J.T. Tucker, Trans. ASME., **74**, (1952). p. 783 Tucker, J.T., Jr. E.E. Coulter, and L.F. Kooistro, Trans. ASME., **82**, Ser. D. 465 (1960).
- 3) たとえば, Finnie, I., and W.R. Heller, Creep of Engineering Materials, McGraw-Hill (1959). A.E., Johnson, Metallurgical Review, **5** (1960).
- 4) 応力測定法, 朝倉書店 (1955).
- 5) 平修二, 小寺沢良一, 大谷隆一, 日本機械学会, 第40期通常総会講演前刷集, No. 85, P47 (1963).
- 6) Coffin, L.F., P.R. Shepler, and G.S. Cherniak, J. Appl. Mech., **16**, 229 (1949)