管状試験片によるクリープ破断試験について*

池 島 俊 雄** 丸 岡 秀 俊***

On a Creep Rupture Test Applied to the Tubular Specimen

by

Toshio IKEJIMA and Hidetoshi MARUOKA

(Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries Co., Ltd.)

Many high temperature alloys are used in tubular forms, but most of creep strength or creep-rupture strength data for these materials are based on simple tension bar specimens. The high-temperature strength data based on bar specimens can't eliminate many of discrepancies between test of specimens and actual service. Many of investigators have developed the method closely simulated actual service condition. This method is the creep-rupture test adopted for a tubular specimen under internal steam pressure and at a controlled temperature. The author compared the creep-rupture characteristics of tubular and bar specimens for rolled material and welded joint. The following results were obtained:

(1) Agreement between the data of tubular and bar specimens of 18Cr-8Ni-Ti steel is good when the equivalent stress in tube wall is calculated on the formula which developed in ASME.

(2) In case that the strength of weld metal is stronger or indicates a similar degree of strength as compared with base metal, the creep-rupture strength of 18Cr-8Ni-Ti welded joint indicates the similar strength in comparison with base metal.

(3) In case that the strength is weaker than base metal, this 18Cr-8Ni-Ti welded joint decreases in high-temperature strength. But the degree of strength-lowering in the test applied to the bar specimen is more remarkable than that in the case applied to the tubular specimen.

(4) The creep-rupture strength of dissimilar joint between 18Cr-8Ni-Ti steel and 2 1/4 Cr-1 Mo steel is lower than the strength of 2 1/4 Cr-1 Mo steel. But, the degree of strength-lowering is more remarkable in the case of the bar specimen than in the case of the tubular specimen.

(Received Nov. 30, 1961)

1. 緒 言

溶接継手の高温強度の研究を行なう場合には、継手の応力状態を充分考慮しておくことが必要である。一般に最も広く用いられているクリープ破断試験は、丸棒試験片を用いる単純な引張試験である。溶接継手のクリープ破断試験にこのような丸棒試験片を用いることは、母材と溶接金属との境界面にほぼ直角方向の一軸引張応力が加わる状態での試験ということになる。ところが鋼管の溶接継手では、内圧により円周方向、軸方向および半径方向の三軸応力を受け、その最大主応力は円周方向の引張応力であって、母材と溶接金属との境界面にほぼ平行である。

したがって、鋼管の溶接継手の高温強度を研究する際に、丸棒試験片を用いたクリープ破断試験を実施す

ることは、溶接継手の使用条件と非常に異なる状態での試験となり、その結果を直ちに使用するには多くの問題点が内蔵されているものと推察することができる。このような点を解明するために、筆者らは圧延材および溶接継手について、丸棒試験片と管状試験片とを用いたクリープ破断試験の比較をするようにした。

管状試験片によるクリープ試験あるいはクリープ破断試験はすでに Norton, Kooistra および Davis によって研究が進められており、筆者らはこれらの報告を参考にして試験装置の試作を行ない、実験を行なうようにした。

2. 18Cr-8Ni-Ti 鋼のクリープ破断試験

溶接継手の比較に先だち、まず溶接金属を含まない圧延材について管状試験片と丸棒試験片とによるクリープ破断試験の比較をした。供試材料は Table 1 に示す。

丸棒試験片は熱間圧延後冷間圧延を行なった板から

* 原稿受付 昭和36年11月30日、当協会第4回高温強度シンポジウムにて講演(昭36.9)

** 正員 住友金属工業(株)中央技術研究所

*** 住友金属工業(株)中央技術研究所

平行部外径 6 mmφ×標点距離 30 mm の試験片を作成するようにした。溶体化処理は 1 050°C×1/2 h W.Q. である。管状試験片は外径 50・8 mmφ×肉厚 7 mm の冷間仕上鋼管を用い、丸棒試験片と同じ熱処理を行なった後、内外面を削って外径 47 mmφ×肉厚 3・5 mm×平行部長 350 mm の試験片を作成した。試験片の形状は Fig. 1 に示す。

管状試験片によるクリープ破断試験を行なう場合には、一軸引張応力の下におけるクリープ破断試験との比較ができるように、等価応力でもって試験結果の整理をすることが必要である。鋼管の応力計算式は Buxton⁵⁾ および Burrow⁶⁾ が一般によく使用されている計算式の紹介を行ない、さらに ASME にて行なった応力計算式の検討結果について報告している。筆者らはその中で下記の計算式を用いて管状試験片によるクリープ破断試験結果を丸棒試験片のそれと比較するようにした。

$$\text{薄肉円筒の式} \quad \sigma = \frac{P(D-2t)}{2t}$$

$$\text{平均径の式} \quad \sigma = \frac{P(D-t)}{2t}$$

$$\text{Barlow の式} \quad \sigma = \frac{PD}{2t}$$

$$\text{Modified Laméの式} \quad \sigma = P \left(\frac{1}{2} \frac{D}{t} - 0.4 \right)$$

$$\text{ASME 応力計算式} \quad \sigma = P \left(\frac{1}{2} \frac{D}{t} - y \right)$$

P : 内圧

σ : 等価応力あるいは円周方向応力

D : 鋼管の外径

t : 鋼管の肉厚

Fig. 1 Tubular specimen used

いま、試験温度 650°C の下で、丸棒試験片と管状試験片とによるクリープ破断試験結果を比較すると Fig. 2 のようになる。図からわかるように、薄肉円筒の式による計算応力を用いると、管状試験片は丸棒試験片よりクリープ破断強度がやや低下する傾向にある。ところが、Modified Lamé の式、平均径の式および Barlow の式による応力を用いると、逆に丸棒試験片より強度が高くなる傾向にある。一方、ASME 応力計算式による応力を用いると、丸棒試験片と全く同じクリープ破断を示すことがわかった。

多軸応力状態における材料のクリープ破断については従来から発表された報告が少なく、したがって、管状試験片と丸棒試験片とによるクリープ破断強度の差を理論的に推定することはできない⁷⁾。しかし、筆者の実験結果あるいは Tucker らの報告によると、クリープを考慮に入れた ASME 応力計算式を用いるならば、比較的薄肉の管状試験片と丸棒試験片とによるクリープ破断強度との間には実用上ほとんど差がないものと考えてよい。

3. 18Cr-8Ni-Ti 鋼溶接継手のクリープ破断試験

次に、最近火力発電用ボイラに使用されるようになった 18Cr-8Ni-Ti 鋼管の溶接継手について、管状試験片と丸棒試験片とによるクリープ破断試験を実施す

Fig. 2 Comparison of results of creep-rupture test using tubular and bar specimen

Table 1 Chemical analysis of material tested

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Ti
18 Cr-8 Ni-Ti	0.06	0.46	1.41	0.021	0.015	0.09	17.40	11.70	0.52

Table 2 Chemical analysis of rolled material and deposit metals

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Creep-rupture strength at 10 ⁴ h (kg/mm ²)
18 Cr-8 Ni-Ti rolled material	0.06	0.46	1.41	0.021	0.015	0.09	17.40	11.70	—	—	0.52	9.9
347-C deposit metal	0.06	0.60	1.53	0.013	0.010	0.15	20.60	10.22	—	0.77	—	12.0
16-8-2-A deposit metal	0.08	0.24	1.36	0.011	0.016	0.13	14.80	7.90	1.49	—	—	7.3
16-8-2-B deposit metal	0.08	0.23	1.62	0.013	0.015	0.12	15.55	9.26	1.82	—	—	10.6

ることとした。供試鋼材および溶接棒の化学組成は Table 2 に示す。参考のために、これらの供試材料をそれぞれ単独にてクリープ破断試験を行ない求めた強度も並記するようにした。

この表からわかるように、18Cr-8Ni-Ti 鋼の母材と比較して、各溶着金属のクリープ破断強度は 347-C の場合は高く、16-8-2・A の場合は低く、16-8-2・B は同程度ということになる。したがって、これらの溶接棒による溶接継手のクリープ破断試験はそれぞれ溶接金属が母材より強い場合、弱い場合および同程度の場合についての試験になる。

これらの溶接継手について前節と同じように、試験温度 650°C でのクリープ破断試験を実施した。管状試験片は Fig. 1 と全く同じ寸法であって、中央部に円周方向の溶接継手をもっている。丸棒試験片は供試鋼管に似せた圧延および溶体化処理を行なった板の溶接継手から採取するようにした。平行部直径 6 mmφ×

Fig. 3 Results of creep-rupture test of 18Cr-8Ni-Ti welded joint using bar specimen

Fig. 4 Results of creep-rupture test of 18Cr-8Ni-Ti welded joint using tubular specimen

標点距離 70 mm の試験片である。いずれの試験片も溶接のままで使用することにした。

試験結果は Fig. 3 および Fig. 4 に示すとおりである。図からわかるように、347-C および 16-8-2・B 溶接棒による溶接継手では、管状試験片および丸棒試験片ともに母材とほとんど変わらない強度を示すが、16-8-2・A 溶接棒による溶接継手では母材よりやや低い強度を示す。しかし、管状試験片と丸棒試験片とにおいて強度低下の割合が異なり、丸棒試験片のほうが顕著な低下を示すことがわかった。この溶接継手のクリープ破断強度は丸棒試験片では母材の 78~80 % であるのに対し、管状試験片では 88~94 % である。このような相違は溶接金属に加わる応力状態によって大きく影響されるものと考えられる。母材より弱い溶接金属は試験中に両側の母材によってクリープ変形を拘束される。したがって、丸棒試験片では、上下の母材の拘束により融合線付近の溶接金属に半径方向の引張拘束応力を生じているものと考えられる。一方、管状試験片ではクリープ破断に主として寄与するのは円周方向応力であり、この応力が溶接金属と母材との境界面に平行に働いているので、溶接金属には左右の母材の拘束のために円周方向の圧縮拘束応力を生じていると考えられる。

このように生成した拘束応力の大きさおよび方向の相違が、母材より弱い強度を示す溶接金属を持った溶接継手において、管状試験片と丸棒試験片との間に認められた強度差に大きく影響するものと考えられる。また、溶接金属が母材より強い溶接継手あるいは同程度の強度の溶接継手が母材と変わらない強度を示すことからわかるように、熱影響部が継手の強度に影響することはほとんどなく、継手強度は主として溶接金属によって影響されることがわかった。

4. 18Cr-8Ni-Ti 鋼と 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼との異材溶接継手のクリープ破断試験

火力発電用ボイラに 18Cr-8Ni-Ti 鋼管が使用されるようになってきたために、2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼管との異材溶接が問題になっているので、この節では異材溶接継手のクリープ破断試験を実施する。Table 3 に供試鋼材および溶接棒の化学組成を示す。この異材溶接継手には、従来から用いられてきた D347 溶接棒ととも

Table 3 Chemical analysis of rolled materials and deposit metals

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti
2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo rolled material	0.10	0.26	0.46	0.014	0.006	0.14	2.28	—	1.02	—	—
18Cr-8Ni-Ti rolled material	0.06	0.40	1.45	0.022	0.007	0.08	16.90	11.96	—	—	0.56
D 347 deposit metal	0.06	0.60	1.53	0.013	0.010	0.05	20.60	10.22	—	0.77	—
Inconel deposit metal	0.05	0.26	1.72	0.012	0.016	0.05	15.93	70.23	1.67	1.11	—

に Tucker ら⁸⁾によって有効であることが認められたインコネル溶接棒を用いることにした。

管状試験片の形状は Fig. 5 に示す。18Cr-8Ni-Ti 鋼管による拘束をできるだけ少なくするために、溶接金属の位置を中央部から移動させた。丸棒試験片は板の溶接継手より採取した。平行部直径 10 mmφ×標点距離 50 mm である。

650°C にて行なった試験結果は Fig. 6, Fig. 7 に示すとおりである。図からわかるように、丸棒試験片によるクリープ破断試験では、異材溶接継手は母材よりかなり強度が低下している。D347 溶接棒による溶接継手は 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼母材の 64 % にまで低下し、インコネル溶接棒による溶接継手は 73 % にまで低下している。

一方、管状試験片によるクリープ破断試験では、短時間側では溶接継手は母材と全く変わらない強度を示すが、長時間側では母材よりやや低い強度を示す傾向にある。しかし、丸棒試験片ほど顕著な低下を示さないことがわかった。

Fig. 5 Tubular specimen using to the dissimilar welded joint

Fig. 6 Results of creep-rupture test of dissimilar welded joint using to bar specimen

Fig. 7 Results of creep-rupture test of dissimilar welded joint using to tubular specimen

このように、異材溶接継手においても、管状試験片と丸棒試験片とにより 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼母材からの強度の低下がかなり異なっているが、この理由は次のように考えられる。前節と同じように、異材溶接継手でも溶接金属近傍にて試験中に拘束応力を生ずることが予測されるが、丸棒試験片では 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼とオーステナイト溶接金属との耐酸化性の相違のために、試験中に融合線に沿って切欠きを生じ、この切欠きが試験応力にほぼ直角であるために、試験片が切欠きを生じた融合線に沿って破断することになる。しかも、融合線付近の熱影響部は母材より低い強度を示すので、溶接継手の強度が母材より低下するようになると考えられる。ただ、溶接金属によって強度に差を生ずるのは融合線に沿って 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼熱影響部に生成した脱炭層の相違による。一方、管状試験片では、熱影響部のクリープ変形は隣接する溶接金属によって拘束されており、しかも融合線付近に生成した切欠きおよび脱炭層に対して円周方向応力が平行に働くので、これらの効果が大きく作用することなく、2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の母材原質部にて破断する。したがって、母材との強度差をほとんど生じないものと判断しうる。

5. 総 括

以上の試験結果を総括すると次のとおりである。

(1) 溶接金属を含まない 18Cr-8Ni-Ti 鋼のクリープ破断試験結果により、管状試験片の試験結果を ASME 応力計算式による等価応力で整理すると、丸棒試験片とほとんど変わらない強度を示すことがわかった。

(2) 18Cr-8Ni-Ti 鋼溶接継手では、溶接金属が母材より強い場合および同程度の強度の場合は管状試験片および丸棒試験片ともに母材と変わらない強度を示す。一方、溶接金属が母材より弱い場合には母材より強度が低下するが、この強度低下は管状試験片では丸棒試験片ほど顕著でないことがわかった。

(3) 18Cr-8Ni-Ti 鋼と 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼との異材溶接継手の強度は、丸棒試験片による試験では 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼母材よりかなり低下するが、管状試験片ではほとんど低下しないことがわかった。

(4) このような結果から、圧延材のクリープ破断強度は丸棒試験片の結果で充分であるが、鋼管の溶接継手のクリープ破断強度には管状試験片による結果を用いるほうが妥当であると判断しうる。

参 考 文 献

- 1) F.H. Norton, Trans. ASME, 61, 239 (1939)
- 2) L.F. Kooistra *et al.*, Trans. ASME, 74, 783 (1952)
- 3) E.A. Davis, Trans. ASME, 82, 453 (1960)
- 4) 丸岡, 住友金属, 13, 125 (1961)
- 5) W.J. Buxton *et al.*, Trans. ASME, 73, 575 (1951)
- 6) W.R. Burrows *et al.*, Trans. ASME, 76, 427 (1954)
- 7) J.T. Tucker *et al.*, Trans. ASME, 82, 465 (1960)
- 8) J.T. Tucker *et al.*, Weld. J., 35, 457-s (1956)