組織変化を考慮したオーステナイト鋼の長時間 クリープラプチャー強度の推定*

前田 徳美** 清 重 正 典***

Estimation of Long Time Creep Rupture Strength for Austenitic Steel Considering Metallurgical Changes

by

Tokumi MAEDA and Masanori KIYOSHIGE
(Kawasaki Dockyard Co., Ltd., Kobe)

It is a recent tendency that high temperature power plants with more power and higher efficiency, are more in demand, especially for the steam turbine installations. But such increase in power and efficiency is largely dependent on metallurgical advances. Designers and engineers need to know of limitations in regard to the senility of the metals they are considering of using. However, they are obliged to deal with the short time creep rupture data, for the long time creep rupture test requires much time and money. Such short time data needs extensive care in extrapolation for a longer period of time.

Using many data collected by Nihon Gakujitsu Shinko-Kai, the long time creep rupture strength for 18-8 Ti steel and 18-8Cb steel was estimated statistically by various methods, i.e., the extrapolation method by one straight line, Larson-Miller parameter method, Dorn's parameter method, Manson-Haferd parameter method and the extrapolation method by broken line. Although the parameter methods are more convenient because the time and temperature can be expressed with one parameter, the reliability is rather low. The most reliable one in these methods was the extrapolation method by broken line. It is considered that metallurgical changes result in breaks on the straight line. One break appeared at 600°C for 18-8Ti steel and two breaks for 18-8Cb steel. The break point of 18-8Ti steel and the second break point of 18-8Cb steel correspond to precipitating of σ phase. A more reliable extrapolation became possible from these break points, and the slope of each straight line obtained experimentally. Calculation was conducted with the use of this extrapolation method of 10^6 hr rupture strength at various temperatures for 18-8Ti steel and 18-8Cb steel.

(Received Dec. 10, 1963)

1 緒 言

今日、高温高压機関設計の最大の難関は、使用される耐熱材料の強度の信頼性にあるといっても過言ではなからう。これは、設計的な新開発と金属学的な進歩が必ずしも同一歩調で進展しない点にある。しかも、この困難は高压問題よりも高温問題で経験される場合が多い。通常、船用スチームタービンプラントは、一般通念とされている20年間の船舶寿命に適合するよう

に設計される。これを時間に直すと、実に18万時間に相当する。したがって、主要な使用部品がこのような長時間の作動を高温下で満足に行なえるか否かをあらかじめ知る必要を生ずる。すなわち、ある特定の予想寿命のもとで、耐熱材料の強度の不安定性に影響する因子の影響度を予知する必要がある。

近年、わが国においても、クリープおよびクリープラプチャー試験の重要性が認識され、すでに多くの国産耐熱材に関する有益な資料が得られている。しかしながら、クリープ試験の長時間性と対象材の多様性から、得られたデータは断片的であり、個々の材料については、その絶対数がまだまだ不足している。一方、

* 原稿受理 昭和38年12月10日

** 正員 川崎重工業株式会社技術研究所 神戸市生田区東川崎町

"

"

Table I. Number of creep rupture test data

Material	18-8 Ti steel					18-8Cb steel				
	0~10 ³ hr	10 ³ ~10 ³ hr	10 ³ ~10 ⁴ hr	>10 ⁴ hr	Total	0~10 ³ hr	10 ³ ~10 ³ hr	10 ³ ~10 ⁴ hr	>10 ⁴ hr	Total
Temperature										
550℃	1	3	—	—	4	—	2	2	—	4
600℃	4	6	6	1	17	9	7	5	—	21
650℃	31	79	41	2	153	15	29	17	(3)	61+(3)
700℃	13	14	4	—	31	3	4	3	—	10
815℃	1	1	2	—	4	3	2	3	—	8
Total	50	103	53	3	209	30	44	30	(3)	104+(3)

() : British data

新しく開発された材料についても、それが長時間の使用に適するか否かを結論するには相当の時間と多くの試験結果が必要である。したがって、常にわれわれは小数かつ短時間のデータに基づいて、長時間域における材料評価を行なうことを余儀なくされる。

筆者らは、かようなクリープ破断試験データの取り扱いについて、すでに提出されている二・三の外挿法の比較検討を行ってきたが、本稿は、国内で収集された 18-8Ti 鋼および 18-8Cb 鋼のクリープ破断試験データを用いて、その取り扱い方を検討すると共に、長時間側のクリープ破断強度を組織変化の過程を考慮しつつ推定したものである。

2 使用データの統計的性質

使用データの総数は 18-8Ti 鋼 209 点、18-8Cb 鋼 104 点で、試験温度は 550℃、600℃、650℃、700℃、815℃、の 5 段階である。各温度、各時間領域内におけるデータの数を Table I に示す。両鋼種共、650℃のデータが最も多いので、この中より、一定応力条件で最もデータ数の多い場合のおの二つを選んで、破断時間のバラツキを調べた。Fig. 1 にこれを示す。すなわち、破断時間の対数を取り、その平均値を中心に

$$i = \frac{R}{1 + 3.322 \log N} \quad \left(\begin{array}{l} R : \text{データの幅} \\ N : \text{データの数} \end{array} \right)$$

の区間における頻度を示した。18-8Cb 鋼ではデータ

Fig. 1. Distribution curve of creep rupture data at constant condition for 18-8Ti and 18-8Cb steel

数が少ないため、分布形態は明りょう性を欠くが、18-8Ti 鋼では、平均値のまわりにほぼガウス分布をなすことが明らかである。

Table II は 18-8Ti 鋼 650℃におけるデータについて、破断時間の対数の平均値、標準偏差および 99.9% 信頼限界を示したものである。標準偏差は 0.23~0.42 まで変化しているが、20kg/mm² 以上でややその傾向が認められる以外は、その応力依存性は明らかでない。99.9% 信頼限界は Fig. 2 に示すように、破断時間に

Table II. Mean value, standard deviation and 99.9% confidence interval of creep rupture date at 650℃ for 18-8 Ti steel

18-8 Ti steel at 650℃					
Stress (kg/mm ²)	Mean value log (hr)	No. of data	Standard deviation	99.9% confidence I. lower critical point	99.9% confidence I. upper critical point
25	1.5445	14	0.4243	0.1481	2.9409
20	2.3330	28	0.3802	1.0818	3.5842
17	2.6125	14	0.3017	1.6196	3.6054
15	2.8745	32	0.3345	1.7737	3.9753
13	3.0829	9	0.2280	2.3326	3.8332
10	3.5720	8	0.3556	2.4017	4.7423

Fig. 2. 99.9% confidence interval of rupture time at 650°C for 18-8Ti steel

対して、非常に大きな幅を有している。これは、本データが、国内の材料メーカーで得られたデータの寄せ集めであることにも一因があろう。

3 各種外挿法による長時間値の推定

3・1 1000 時間までのデータによる直線外挿

従来、一般に使われている直線外挿を 1000 時間までのデータについて適用した。すなわち 0~1000 時間内に破断したすべてのデータより最小二乗法により直線の方程式を得て線を描き、その延長線と 1000 時間以上の実測値との関係をみた。Fig. 3, 4 にこれを示す。18-8Ti 鋼は 18-8Cb 鋼に比して長時間側における推定値と実測値の差が大きい。これは後述するようにクリープ試験中の組織変化が、前者の方が速く起こることに関連している。18-8Cb 鋼においても、650°C で 10000 時間を越えると、同様な差異が現われることが英国の長時間データを後述のように double diagram に併記することにより明らかになった。いずれ

Fig. 3. Creep rupture curve for 18-8 Ti steel

Fig. 4. Creep rupture curve for 18-8Cb steel

にせよ、必要とする 10^5 時間ラプチャー強度を 1000 時間までのデータより直線外挿により求めることは危険この上もない。

3・2 パラメータ法による外挿

近年、多くの長時間推定法が提出されたが、その中で比較的有名な Larson-Miller⁸⁾法、Dorn⁴⁾法および Manson-Haferd⁵⁾法を適用して、平均外挿値を求めた。Fig. 5 および Fig. 6 は Larson-Miller のパラメータ $\theta = T(c + \log t_r)$ により各データをプロットしたもので、定数 c は通常ステンレス鋼に用いられている値、18を用いた。18-8Ti 鋼、18-8Cb 鋼、いずれも長時間側で 700°C と 815°C のデータとの間に大きな差が

Fig. 5. Creep rupture curve based on Larson-Miller parameter method for 18-8 Ti steel

Fig. 6. Creep rupture curve based on Larson-Miller parameter method for 18-8 Cb steel

みられる。この差違の原因は明らかでないが、815°Cのような使用温度よりはるかに高い温度での実測値を得て Larson-Miller 線図を完成し、これより低温、長時間の外挿値を算出すると実際より高目になることを意味するので注意する必要がある。

次に、Dorn 法については、応力 20kg/mm²、15 kg/mm² および 10kg/mm² での破断時間の対数の平均値より、応力をパラメータにして $\log t_r \sim 1/(T+460)$ の関係より ΔH を求め $\ln \theta = \ln t_r - \Delta H/RT$ (ΔH は活性化エネルギー) と応力の関係図を描いた。Fig. 7 および Fig. 8 にこれを示す。815°Cと700°Cのデータはほぼ同一線に乗っており、この場合は高温データも有効に低温長時間外挿に使用できることがわかる。

Fig. 7. Creep rupture curve based on Dorn's parameter method for 18-8Ti steel

Fig. 8. Creep rupture curve based on Dorn's parameter method for 18-8Cb steel

最後に Manson-Hafard 法は、応力をパラメータとして $\log t_r$ (平均値) $\sim T''(F)$ 線図を描き、各直線の交点の座標 ($\log t_r = \log t_a$, $T = T_a$) を得、 $p = T - T_a / \log t_r - \log t_a$ に対して Fig. 9 および Fig. 10 に示すグラフを得た。これでは低応力側で平均線は直線的となっており、長時間外挿には上述の二法より精度が良いと考えられる。

Fig. 9. Creep rupture curve based on Manson-Hafard parameter method for 18-8 Ti steel

Fig. 10. Creep rupture curve based on Manson-Hafard parameter method for 18-8Cb steel

Table III. 10⁶hr rupture strength extrapolated by various methods for 18-8 Ti steel and 18-8 Cb steel

Material	Method	10 ⁶ hr creep rupture strength (Mean value) (kg/mm²)			
		550°C	600°C	650°C	700°C
18-8 Ti steel	Straight line method (<10 ⁶ hr)	—	15.0	9.0	4.8
	Larson-Miller method	17.5	11.0	5.8	3.0
	Dorn method	15.0	9.0	4.3	2.5
	Manson-Hafard method	14.0	7.5	4.0	2.0
18-8 Cb steel	Straight line method (<10 ⁶ hr)	20.0	15.0	8.0	5.8
	Larson-Miller method	19.0	12.0	7.5	4.0
	Dorn method	17.0	11.0	6.0	3.0
	Manson-Hafard method	17.0	9.5	6.5	2.5

以上の各方法により求めた 10^5 hr クリープラプチャー強度値を Table III に一括して示す。直線法は問題外として、一般に Larson-Miller 法は他の方法に比べて高目の値を得ている。次いで Dorn 法, Manson-Haferd 法は最も低い値を示す。

3・3 折線法による外挿

パラメータ法は温度と時間を1つのパラメータに含ませることにより、単1曲線により外挿が可能であるという利点を有するが、材料内の組織変化は無視されがちである。組織変化は、温度依存性が大で、合金元素の基地への溶解度にも依存し、高温と低温とでは、その変化の速度のみならずメカニズムが異なる場合もある。本法はクリープ試験中の組織変化を考慮に入れて外挿を行なおうとするものである。

Fig. 11 および Fig. 12 は各温度ごとにすべてのデータをプロットしたのち、折点の現われる付近を境としてデータをグループ別にわけ、そのグループ内のデータを用いて最小二乗法により平均直線を求めて描いたものである。18-8Ti 鋼では各温度でのおおの1個の折点、18-8Cb 鋼ではおおの2個の折点を得られた。この折点の原因を確認するために W. Koch らの

組織変化の研究結果の一部を用いて Fig. 13 に示す double diagram を作成した。

18-8Ti 鋼および 18-8Cb 鋼のクリープ荷重下における組織変化過程は Fig. 13 にも示すように

であると考えられているが、Fig. 13 から 18-8Cb 鋼の 600°C におけるクリープラプチャー曲線上の第1の折点に上述の過渡期の組織から MeC および Me_{23}C_6 を生ずる時期に相当しており、18-8Cb 鋼第2の折点および 18-8Ti 鋼の折点は σ 相の折出に対応している。

Fig. 13. Relation between creep behaviour and structure change for 18-8Ti steel and 18-8Cb steel

Fig. 11. Creep rupture curve at various temperature for 18-8 Ti steel (drawn as the straight line with breaks)

Fig. 12. Creep rupture curve at various temperature for 18-8 Cb steel (drawn as the straight line with breaks)

一方折点間の直線の傾斜角度は Fig. 14 に示すように温度に関して直線関係が成立する。図でわかるとおり、18-8Ti 鋼に比較して 18-8Cb 鋼の傾斜角度が大きいのは、後者が結晶粒劣化の温度依存性が著しいことがわかる。この傾斜角度—温度線図を高温側で求めておき、必要とする温度での短時間データから折線外挿によって長時間値を求めれば、実用的に精度のよい外挿が可能である。

Table IV はこの方法により、本データについて求めた 10^5 時間クリープラプチャー強度である。この求め方について詳しくは他を参照されたい。650°C 以下

Fig. 14. Log slope versus temperature for 18-8-Ti steel and 18-8 Cb steel

Table IV. 10^5 hr creep rupture strength extrapolated by folding line method

Material	10 ⁵ hr creep rupture strength (kg/mm ²)				
	550°C	600°C	650°C	700°C	815°C
18-8 Ti steel	14.0	8.0	5.5	3.0	1.5
18-8 Cb steel	19.0	11.0	6.5	2.0	<1.0

では 18-8Ti 鋼よりも 18-8Cb 鋼の方がすぐれているが、650°C 以上では逆になっている。

以上述べた外挿法は、主として多数のデータの平均値を用いたものであるが、設計資料を得るための整理法としては、データの統計的バラツキを考慮する必要がある。いずれの外挿法を適用するかは、各鋼種について最も適当なものを選んでおき、得られたすべてのデータを用いて統計的手法により Computer によって計算を行ない、そのバラツキの範囲を求め、信頼限界を明示し、その下限値をもって設計における許容応力の基準とすれば、最も信頼される基準値が得られると共に、経済的かつ安全性の高い高温高压プラントの設計が可能となろう。

4 結 言

18-8Ti 鋼および 18-8Cb 鋼に関する国内の収集資料を用い、その統計的バラツキを知ると共に、各種の外挿法を適用して長時間ラプチャー強度値を求めると共に組織変化を考慮した折線外挿法を適用して次の結果を得た。

(1) 一定温度、一定応力下におけるクリープ破断時間の対数はその平均値のまわりに一般にガウス分布をすると考えられる。

(2) 1000 時間までのデータより直線的に外挿を行なうことは 18-8Ti 鋼や 18-8Cb 鋼のようにクリープ過程中で組織変化の生ずる鋼にとつては適当でない。

(3) Larson-Miller 法、Dorn 法、Manson-Haferd 法、三法の比較結果では L-M 法が高目の値を得、D 法、M-H 法となるに従い、長時間外挿値は低目となり信頼度が高まる。

(4) 組織変化を考慮した折線外挿法により 18-8Ti 鋼および 18-8Cb 鋼に関しては精度よく長時間ラプチャー強度が推定できるが、その推定値は他の推定法に比べ低目になる。

(5) 折線外挿法は、比較的多数の試験データを必要とするが、現在のところでは仮定の多い他のパラメータ方式あるいは経験式による方法よりも実行しやすく健全性も高いので、特に、船用耐熱材料の推定法として有効であろう。

(6) 折線外挿法により求めた 10^5 hr プチャー強度は 550°C~650°C の温度範囲では 18-8Cb 鋼がすぐれ 700°C 以上では 18-8Ti 鋼がすぐれていることで判明した。

オーステナイト鋼のクリープラプチャー曲線を多数本の折線の時間的に継続する連続体として理解すると、固有クリープ抵抗に影響する組織因子は比較的初期における折点軌跡の形成に影響し、潜在クリープ抵抗に影響する組織因子は後期のそれに影響すると考えられる。今後のクリープ問題に関する組織研究の一課題として、いたずらに新材料の開発、品質改善のみに走ることなく、クリープラプチャー挙動と組織の関係を明らかにし、長時間推定の基礎を強化して行くことが望ましい。

(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) 前田徳美, 清重正典, 第5回高温強度シンポジウム資料 (1962).
- 2) 日本学術振興会, 第129委金属材料の強度と疲労, 第3分科会収集資料.
- 3) Larson, F.R., and J. Miller, Trans. ASME., **74**, 765 (1952).
- 4) Orr, R.L., O. Serby, and J.E. Dorn, Trans. A.S.M., **46**, 113 (1954).
- 5) Manson, S.S., and A.M. Haferd, NACA TN., 2890 (1953).
- 6) Koch, W. Stahl, und Eisen, **18**, 1251 (1958).
- 7) 前田徳美, 清重正典, 耐熱金属材料研究委員会報告集, **2**, 268 (1963).