PRIMARY CREEP OF STRUCTURAL STEEL (SS 41) AT HIGH TEMPERATURES

By Morihisa FUJIMOTO*, Fukujiro FURUMURA**
Takeo AVE*** and Yasuji SHINOHARA****
Members of A.I.J.

ABSTRACT

Results of a primary creep study conducted on structural steel (SS 41) specimens in tension are presented. These specimens were subjected to various constant loads and high temperatures from 350 to 600°C for 6 hours. Also presented is a mathematical expression, shown in a term of product of exponential functions with material constants. The expression is originally based on that developed by Nishihara and others, and modified by authors to suit more wide range of stress level and temperature. Besides, the stress-strain curves obtained together with creep curves are shown, and the correlation between creep strain and elastic-plastic strain is clarified by these curves.

1. INTRODUCTION

Because of the great concentration of people and property in highrise buildings, the potential risk of large loss of life and property due to fire must be minimized. Traditionally structural engineers have accepted in their fire safety design the guidance of the minimum requirements of existing fire protection standards of building standard law. According to the standards, the fire safety performance of structural elements are evaluated by the Standard Furnace Fire Test, Japanese Industrial Standard (JIS) method A 1304. This is a haphazard procedure, as the standard furnace fire endurance of structural elements has little relation to the structural element endurance in an actual compartment fire. The standard furnace fire test results, though obtained at great cost, do not contribute to the understanding of the behavior of structural elements in an elevated temperature environment and cannot be applied rationally in fire safety design. The response of a highrise structure in a fire is a very complex problem. A rational analysis of the problem requires the solution to some basic tasks. It is one of these basic tasks that the time deformation and thermal creep behavior of the steel structure can be determined according to the temperature dependent material properties. A great deal of research result is available for the design of structures such as turbine and nuclear reactors to determine the long-term creep deformation behavior at constant elevated temperature. Very little is known, however, for high-rise structures in fire in which the creep process is relatively short term but with high temperature rate. The success of analyzing the behavior of steel structures in a fire depends on how accurately certain mechanical properties, especially creep of steel, are known in the 350 to 600°C temperature range^{(1) (2) (3) (4)}. Then, the main purpose of this study is to make clear the creep behavior and relationship between creep strain and elastic-plastic strain of structural steel, SS 41. The work is confined to a study of creep behavior of steel under constant load and temperature.

2. SPECIMENS

Structural steel, SS 41, were used. The steel specimens were cut out from steel plates of 25 mm thickness in the same direction as that of hot rolling. The size of specimen is shown in Fig. 1. The

* Dr. Eng., Professor, Tokoyo Institute of Technology.

** Dr. Eng., Associate Professor, The Research Laboratory of Engineering Materials, Tokoyo Institute of Technology.

*** Graduate Student, Tokoyo Institute of Technology.

**** Division of Structural Design, Mitsubishi Heavy Industry Co. Ltd.

mechanical property and the chemical composition of steel are given in Tables 1 and 2. The gauge length is 50.8 mm.

3. TESTING PROCEDURE

Creep tests were carried out on a universal screw-power testing machine equipped with an electric furnace (See Fig. 2). The temperature of the furnace was controlled by a time-proportioning, integrating and differentiating controller. Special tensile tools were designed and made from heat resisting steel for transferring the load from the crosshead of the testing machine to the specimen within the furnace. The differential transformer of the deformation recording system was mounted underneath the furnace on small aluminum holders. These were fastened with screws to four extension arms which were tightened through springs with screws to the specimen. A specimen with the loading assembly and high temperature extensometer are shown in Figs. 2 and 3. To minimize the circulation of air inside the furnace the gap between the stem of the loading tools and the furnace was partially filled with a fibrous and a boardlike insulation. Each specimen was tested at high temperatures which covered the 350 to 600°C temperature range at 25°C increments. The applied stresses at each temperature were 3 to 5 levels at 2.5 kg/mm² increments. As a general rule, one specimen was tested at each temperature and stress level for 6 hours. The whole test conditions of steel specimens are give in Table 3.

4. TEST RESULTS

The typical creep and stress-strain curve obtained on the recorder of the testing machine is shown in Fig. 4. The stress-strain curves obtained at high temperatures are shown for reference in Fig. 5. The tensile test conditions are given in Table 4 and mechanical properties at high temperatures is shown in Table 5. The creep curves of structural steel, SS 41, are shown in Figs. 6 and 7. In these figures, the mark, $\blacktriangle$ shows the strain when stress was increased to the appointed level. Some examples of the stress-strain curves obtained together with creep curves are shown in Fig. 8. In these figures, the horizontal straight lines show the creep strains and the curves following them show the stress-strain curves obtained after the finish of creep tests. From these figures, the relationship between creep strain and elastic-plastic strain is clarified, that is, the stress-strain curves arises with the same gradient as the initial tangent and follows the virgin stress-strain curve with a short interval at low level of stress. Creep strain is effected by stress, temperature and time. The influence of time on the

Fig. 1 Shape and size of a specimen

Table 1 Chemical composition (%)

JIS grade	C	Si	Mn	P	S
	× 100			× 1000	
SS 41	18	24	73	16	17

Table 2 Mechanical properties

JIS grade	Yield Point (kg/mm ²)	Tensile Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
SS 41	24.89	44.0 /	38.0

Fig. 2 General view of the testing machine with furnace and loading assembly

Table 3 Creep test conditions

(SS 41)

T-°C	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	30.0
300												
325												
350												
375												
400												
425												
450												
475												
500												
525												
550												
575												
600												

σ-STRESS (kg/mm²)
T-TEMPERATURE (°C)

Fig. 3 Details of the loading assembly and extensometer

Fig. 4 Typical creep and stress-strain curve obtained on the recorder (SS 41, 475°C, 20.0 kg/mm²)

Fig. 5 Stress-strain curve of steel at high temperatures

primary creep of structural steel was great within 30 minutes from the start of creep test. The creep strain was greatly affected at higher temperature than 450°C and therefore cannot be ignored at analyzing the thermal stress of structure in fire. Besides, with regard to stress, creep strain was very increased when the stress level was greater than the proportional limit.

5. MATHEMATICAL EXPRESSION

Fig. 9 show the relationship between creep strain and time in log-log scale. From these figures, it is understood that the relation between the logarithmic creep strain and the logarithmic time is approximately linear at each temperature and stress level, and is expressed as follows;

$$\epsilon_c = 10^A t^n \dots \dots \dots (1)$$

where ϵ_c is creep strain, t is time and A and n are constants. When the stress

Table 4 Tensile test conditions

G	T	R.T.	100	200	300	400	500	600
SS 41		•	•	•	•	•	•	•

G; JIS grade

T; Temperature (°C)

R.T.; Room temperature

Table 5 Yield strength and modulus of elasticity

T	SS 41	
	Yield Strength (kg/mm ²)	Modulus of Elasticity (×10 ⁴ kg/mm ²)
R.T.	24.89	2.15
100	23.69	2.03
200	22.32	2.07
300	18.69	1.86
400	16.52	1.87
500	15.47	1.60
600	10.47	1.48

G; JIS grade

T; Temperature (°C)

R.T.; Room Temperature

Table 6 Material constant

JIS grade	a	b	c	d	e	f
SS 41	-7.45 × 10 ³	3.71	1.78 × 10 ³	1.82	6.47 × 10 ⁻⁴	-1.51 × 10 ⁻¹

levels are changed at each constant temperature, the gradients of these straight lines also changed. Fig. 10 and 11 show how the constant n in equation (1) is varied with the change of stress level at each temperature, or with the change of temperature at each stress level, respectively. Therefore, n is in general a function of temperature and stress. However, at the lower temperature range (350 to 500°C), the change of n with regard to the variation of stress is comparatively small for each constant temperature. This means that in Fig. 9, the straight lines under several stress levels at each constant temperature are nearly parallel. But, at the higher temperature range (525 to 600°C), the variation of n

Fig. 6 Total strain versus time at indicated temperature and stress levels

Fig. 7 Total strain versus time at indicated temperature and stress levels

regarding stress is considerably large. Fig. 12 show the relationships between creep strains and stress under several constant temperatures at some particular times. From these figures, it is clarified that the logarithmic creep strain is approximately linear with respect to the logarithmic stress at each particular time under constant temperatures. The mathematical expression for the prediction of creep strain, ϵ_c , under arbitrary stress levels at constant temperature are, therefore, as follows;

$$\epsilon_c = 10^A \sigma^B t^n \dots \dots \dots (2)$$

where σ is stress, t is time, A and B are constants and n is a function of stress.

On the other hand, the relationships between the logarithmic creep strains and the reciprocal of absolute temperatures under several stress levels at particular times are not always considered to be linear as shown in Fig. 13. However, if it could be assumed that these relationships were approximately linear for simplification, A in equation 2 under constant stress at particular time is represented as follows;

$$A = \frac{a}{T} + b \dots \dots \dots (3)$$

where T is absolute temperature, and a and b are constants.

Besides, if it could be assumed that the relationships between logarithmic creep strains and logarithmic stress at each particular time under constant temperatures were approximately linear (See Fig. 12), B in equation (2), at particular time under constant temperatures is obtained as the gradient of these straight lines. Fig.

Fig. 8 Stress-strain curves obtained at creep test

14 shows how the constant B in equation (2) is varied with the change of reciprocal of absolute temperature at some particular times. From Fig. 14, it is understood that the relationships between B and the reciprocal of absolute temperature are very complicated, but for simplification, if it is assumed that these relationships are approximately linear, B in equation (2), at particular time is represented as follows;

Fig. 9 Creep strain versus time curves

Fig. 10 Temperature and stress dependence of constant "n".

Fig. 11 Temperature and stress dependence of constant "n".

Fig. 12 The relation between creep strain at particular times and applied stress at various temperature

Fig. 13 The relation between creep strains at particular times and reciprocals of absolute temperatures under various stress levels

$$B = \frac{c}{T} + d \quad \dots\dots\dots (4)$$

where c and d are constants.

Further, from Fig. 10 and 11, if it is assumed that the relationships between constant n and stress and absolute temperature are approximately linear by attaching importance to the higher temperature range in which the creep deformation plays an important role in mechanical behaviour of structural members in fire and for simplification, n in equation (2) under arbitrary stress and temperature could be expressed as follows;

$$n = eT + f + g\sigma \quad \dots\dots\dots (5)$$

where e , f and g are constants.

By substituting equations (3), (4) and (5) in equation (2), the creep strain, ϵ_c , is written as follows;

$$\epsilon_c = 10^{a/T+b} \cdot \sigma^{c/T+d} \cdot t^{eT+f+g\sigma} \quad \dots\dots\dots (6)$$

In this equation, $g\sigma$ in the exponent of time, t , has not so important significance because of the interaction with the other constants and variables. Therefore, by neglecting $g\sigma$, equation (6) becomes as follows;

$$\epsilon_c = 10^{a/T+b} \cdot \sigma^{c/T+d} \cdot t^{eT+f} \quad \dots\dots\dots (7)$$

where ϵ_c (%) is primary creep strain, T (°K) is absolute temperature, σ (kg/mm²) is stress, t (minute) is time and a , b , c , d , e and f are constants. Nishihara and others^{(5) (6) (7) (8)} already proposed the equation to estimate the primary creep strain, ϵ_c , for mild steel as follows;

$$\epsilon_c = 10^{a/T+b} \cdot \sigma^{c/T+d} \cdot t^n \quad \dots\dots\dots (8)$$

Equation (7) has been developed based on equation (8) and is able to suit more wide range of stress level and temperature. The experimental results obtained were used to determine the material constants which were shown in Table 6. The calculated creep strain results are shown in Fig. 15 along with the experimental datas. Considering the possible experimental errors, the calculated creep strains were compared well with the experimental results, validating the expression for the various material constants used above.

6. CONCLUSIONS

Based on the test results and mathematical expression presented in this paper, the following conclusions can be made;

(1) The primary creep strains of structural steel, SS 41, were obtained quantitatively under various constant high temperature and stress levels.

(2) From the test results of stress-strain curves obtained with the creep curves, the relation between elastic-plastic strain and creep strain was clarified, that is, the stress-strain curve after the creep test arose with same gradient as the initial tangent and followed the virgin stress-strain curve with a short interval at low level of stress.

(3) A mathematical expression was developed, using the experimental results, for predicting creep of structural steel, SS 41, including the effects of temperature, stress and time. Calculated creep strains using this expression compared well with the experimental results.

(4) The comparatively good correlation between predicted and experimental creep strains indicates the adequacy of the expression of creep of structural steel, SS 41. However, further experimental and analytical work is required before a more general mathematical expression can be formulated.

7. ACKNOWLEDGEMENT

This work on the primary creep of structural steel at high temperatures was carried out by W.G. "Creep of Structural Steel" (Chairman, Associate Prof. Fukujiro Furumura) of Metals Subcommittee (Chairman, Prof. Morihisa Fujimoto) of Research Committee on Safety of Structural Materials (Chair-

Fig. 14 Temperature and time dependence of constant "B"

Fig. 15 Comparison of experimental and calculated creep of steel at high temperatures

man, Prof. Takeo Naka) which was established in Japan Testing Center for Construction Materials, entrusted by Agency of Industrial Science and Technology.

The authors express their thanks to the Research Committee on Safety of Structural Materials for providing the necessary funds for the project.

REFERENCES

- 1) Furumura, F., and Shinohara, Y.: "Inelastic Behavior of Protected Steel Columns in Fire", Report of the Research Laboratory of Engineering Materials, No. 2, Tokyo Institute of Technology, 1977, pp. 45~61.
- 2) Furumura, F., and Shinohara, Y.: "Inelastic Behavior of Protected Steel Beams and Frames in Fire", Report of the Research Laboratory of Engineering Materials, No. 3, Tokyo Institute of Technology, 1978, pp. 1~14.
- 3) Eggwertz, S.: "Creep Buckling of Steel Column at Elevated Temperatures", IABSE 10th Congress, Preliminary Report, Tokyo, 1976, pp. 235~240.

- 4) Eggwertz, S.; "Creep Buckling of a Steel Column in a Temperature-Time History Simulating a Fire", IABSE 10th Congress, Final Report, Tokyo, 1976, pp. 189~192.
- 5) Nishihara, T., and Tanaka, K.; "Tension and Creep Tests on Mild Steel", Proceedings of the 5th Japan National Congress for Applied Mechanics, 1955, pp. 199~201.
- 6) Nishihara, T., Taira, S., and Tanaka, K.; "Creep of Mild Steel", Technical Reports of the Engineering Research Institute, Kyoto University, Vol. 6, No. 6, 1956, pp. 99~125.
- 7) Nishihara, T., Taira, S., Tanaka, K., and Ohnami, M.; "Primary Creep of Mild Steel", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 23, No. 127, 1957, pp. 154~159.
- 8) Nishihara, T., Taira, S., Tanaka, K., and Ohnami, M.; "Experimental Study on the Relationship between Creep Rate-Determining Factors of Low Carbon Steel", Technical Reports of the Engineering Research Institute, Kyoto University, Vol. 8, No. 2, 1958, pp. 35~57.

高温における構造用鋼材 (SS 41) の第一期 クリープに関する実験 (梗概)

正 会 員 藤 本 盛 久*
正 会 員 古 村 福 次 郎**
正 会 員 安 部 武 雄***
正 会 員 篠 原 保 二****

1. 序

現行法規に従えば、構造部材の耐火性能の評価は、標準耐火試験 (JIS A 1304) によって行われることになっている。しかしながら、標準耐火試験による構造部材の耐火性能の評価は、実際の室内火災における構造部材の耐火性能とはあまり密接な関係にはない。

火災時における高層建物の力学的挙動は極めて複雑なものであるので、この問題を合理的に解析し、火災に対して、より優れた耐火設計を行えるようにするためには、いくつかの重要な基礎的研究を行う必要がある。

その一つとして、鋼構造物の経時変形および高温クリープ挙動を、温度の関数としての材料の性質を用いて決定することが出来る様にする事がある。そのためには、構造用鋼材のクリープ性状に関する資料が必要となる。しかしながら、火災時における鋼構造物の耐火設計に必要なクリープデータは殆ど入手できない。

火災時における鋼構造物の力学的挙動をうまく解析できるかどうかは、鋼のいくつかの力学的性質、特に温度範囲、350~600°C 間におけるクリープ性状を如何に正確に知るかによる。

それ故、本研究の主な目的は、代表的構造用鋼材のクリープ性状およびクリープ歪と弾塑性歪の関係を明らかにすることにある。

この論文では、一定荷重、一定温度下での構造用鋼材のクリープ性状のうち、SS 41 材についてのみ報告する。

2. 試 験 体

構造用鋼材、SS 41 を用いた。試験体は 25 mm 厚の鋼板から圧延方向に削り出した。

試験体の形状・寸法は、図-1 に示すとおりであり、検長は、50.8 mm である。鋼材の化学組成および力学的性質を表-1 および 2 に示す。

3. 実験方法

クリープ実験は、円筒形電気炉を備えたインストロン型試験機を用いて行なった (図-2, 3 参照)。電気炉の温度は自動温度コンドローラーによって調節され、実験室は空調機によって一定温度に制御されている。

電気炉内の試験体に試験機のクロスヘッドから荷重を伝達させるための引張治具は耐熱鋼でできている。

歪の測定には特殊な高温歪計が用いられている。同歪計は、ワイヤストレインゲージ等による較正によって、1 000 分の 1 mm 程度までの測定精度があることが確かめられている。炉内の空気の循環を最少限にするために、加力治具や歪計の棒と炉の間は、繊維および板状の断熱材で充填されている。

実験は、350~600°C の温度範囲において 250°C 間隔で行なった。各温度における作用応力は、3~5 段階で、2.5 kg/mm² の間隔とした。原則として、各温度および応力レベルについて試験体は 1 とし、試験時間は 6 時間とした。試験条件の一覧表を表-3 に示す。

4. 実験結果

試験機の記録計上に得たクリープおよびそれと同時に測定した応力歪曲線の代表例を図-4 に示す。

高温における引張試験による応力歪曲線を参考のために、図-5 に示す。その時の試験条件を表-4 に示す。試験は各温度につき 2 回行なった。これらの曲線から得られた力学的性質を表-5 に示す。

SS 41 材のクリープ曲線全歪を図-6 および 7 に示す。これらの図において、◀印は、応力が指定されたレベルに達した点を示す。

クリープ曲線と同時にえられた応力歪曲線を図-8 に示す。この図において水平な線は、クリープ歪を示しており、それに続く曲線は、クリープ試験が終了したのちに得られた応力歪曲線である。

これらの図から、クリープ歪と弾塑性歪の関係が明らかにされる。つまり、クリープ変形後の応力歪曲線は、初期切線と同じ勾配で立ち上がり、その後、処女応力歪曲線をやや下側から追跡する形のものとなる。

* 東京工業大学 教授・工博

** 東京工業大学 助教授・工博

*** 東京工業大学大学院 院生・工修

**** 三菱重工業株式会社・工修

(昭和55年2月9日本稿受理・討論期限昭和56年1月末日)

クリープ歪は、応力、温度および時間の影響を受ける。構造用鋼材の第一期クリープに対する時間の影響は、試験開始から30分以内で特に顕著である。クリープ歪は450°C以上の高温で著しく大きくなるので、火災時における鋼構造物の熱応力の解析にあたっては、これを無視することはできない。また、応力レベルがその温度での鋼材の比例限度を越えると、クリープ歪は急激に増大する。

5. クリープ歪推定式

図-9にクリープ歪と時間の関係を対数グラフ上に示す。これらの図から、対数クリープ歪と対数時間とは、各々の温度および応力レベルにおいて、ほぼ直線関係にあり、次のように書き表わせる。

$$\epsilon_c = 10^A t^n \quad (1)$$

ここで、 ϵ_c はクリープ歪で、 t は時間であり、 A および n は定数である。温度一定で応力レベルが変化した場合、これらの直線の勾配もまた変動する。図-10および11は、式(1)における定数 n が、各温度において、応力レベルの変化と共にどのように変化するか、および各応力レベルにおいて、温度の変化と共にどのように変化するかを示している。 n は一般には、応力と温度の関数である。しかしながら、比較的低い温度範囲(350~500°C)においては、応力の変化による n の変化は、一定温度下においては比較的小さい。このことは、図-9において、一定温度下でのいくつかの応力レベルでの直線群がほぼ平行であることを意味する。しかしながら比較的高温(525~600°C)においては、応力に関する n の変動動はかなり大きい。

図-12は、いくつかの特定の時間および一定温度下でのクリープ歪と応力の関係を示している。これらの図から、対数クリープ歪と対数応力とは、各々の特定の時間において、一定温度下では、ほぼ直線関係にあることが分かる。それ故、一定温度下で、任意の応力レベル下でのクリープ歪、 ϵ_c の推定式は次のようになる。

$$\epsilon_c = 10^A \cdot \sigma^B \cdot t^n \quad (2)$$

ここで、 σ は応力、 t は時間、 A および B は定数、 n は応力の関数である。

一方、特定の時間における、いくつかの応力レベルでの対数クリープ歪と絶対温度の逆数の関係は、図-13に示すように、必ずしも常に直線関係にあるとは考えられない。しかしながら、単純化のためにこれらの関係は、ほぼ直線関係にあるものと仮定すれば、特定の時間における一定応力下での式(2)の中の A は、次のように表わせる。

$$A = \frac{a}{T} + b \quad (3)$$

ここで、 T は絶対温度であり、 a および b は定数である。

さらに、いくつかの特定の時間における一定温度下での対数クリープ歪と対数応力の関係は、ほぼ直線関係にあるものと仮定すれば(図-12参照)、特定の時間における一定温度下での式(2)の中の B は、これらの直線の勾配として得られる。図-14は、式(2)の中の B が、いくつかの特定の時間において、絶対温度の逆数の変化と共にどのように変化するかを示している。図-14から、 B と絶対温度の逆数との関係は、非常に複雑であることが分かる。しかし、単純化のために、これらの関係は、ほぼ直線関係にあるものと仮定すれば、特定の時間における式(2)の中の B は、次のように表わせる。

$$B = \frac{c}{T} + d \quad (4)$$

ここで、 c および d は定数である。

また、図-10および11から、定数 n と応力および絶対温度の関係は、クリープ変形が、火災時における構造部材の力学的挙動に重要な役割を果たす比較的高温領域に重点を置くことおよび推定式の単純化のため、ほぼ直線関係にあるものと仮定すれば、任意の応力および温度下においては、式(2)の中の n は、次のように表わされる。

$$n = eT + f + g\sigma \quad (5)$$

ここで、 e 、 f および g は定数である。

式(2)に式(3)、(4)および(5)を代入することによって、クリープ歪 ϵ_c は、次のように書ける。

$$\epsilon_c = 10^{a/T+b} \cdot \sigma^{c/T+d} \cdot t^{eT+f+g\sigma} \quad (6)$$

上式において、時間 t の指数中の $g\sigma$ は、他の定数や変数との相互作用のために、必ずしも重要な意味をもたない。したがって、式の単純化も考えて、 $g\sigma$ の項を無視すると、(5)式は次のようになる。

$$\epsilon_c = 10^{a/T+b} \cdot \sigma^{c/T+d} \cdot t^{eT+f} \quad (7)$$

ここで $\epsilon_c(\%)$ は第一期クリープ歪、 $T(^{\circ}\text{K})$ は絶対温度、 $\sigma(\text{kg/mm}^2)$ は応力、 $t(\text{分})$ は時間で、 a 、 b 、 c 、 d 、 e および f は定数である。

西原^{5)~8)}らは、軟鋼に対する第一期クリープの推定式として、次式を提案している。

$$\epsilon_c = 10^{a/T+b} \cdot \sigma^{c/T+d} \cdot t^n \quad (8)$$

(7)式は(8)式を更に発展させたものであり、一層広い応力や温度範囲に対して適用可能である。

得られた実験データを基に材料定数を求めた結果を表-6に示す。計算クリープ歪を、図-15に、実験データと比較して示す。実験誤差を考慮すれば、計算クリープ歪は実験結果とよく一致しており、推定式の有効性を示している。

6. 結 論

この論文で示した実験結果およびクリープ歪推定式に基づいて次の結論が導きだされた。

(1) 種々の温度および応力下での構造用鋼材(SS

41 材) の第一期クリープ歪を定量的に求めることができた。

(2) クリープ曲線と同時に求めた応力歪曲線から、弾塑性歪とクリープ歪間の関係を明らかにすることができた。つまり、クリープ試験後の応力歪曲線は、初期切線と同じ勾配で立ち上がり、その後、処女応力歪曲線をやや下側から追跡する形となる。

(3) 温度、応力 および時間の影響を含んで、鋼材 (SS 41) の第一期クリープ歪を推定する式を実験結果を基に誘導した。この式を用いての計算クリープ歪は実験

値とかなりよい一致を示した。

(4) クリープ歪の実験値および計算値の間の比較的良好な相関関係は、鋼のクリープ推定式の妥当性を示している。しかしながら、更に一般的なクリープ推定式を提示するためには、一層多くの実験と解析が必要である。

最後に、本実験は、通産省、建材試験センター、JMC 委員会 (委員長 仲威雄東大名資教授)、金属分科会 (主査 藤本)、高温クリープ部会 (主査 古村) の昭和 51 年度研究費で行なったものであり、関係者に謝意を表す。