

論文 高温における PC 鋼棒のクリープモデルに関する研究

林 成俊*1・西山 峰広*2

要旨: 高温時における PC 梁部材の力学的挙動を解明するために PC 鋼棒を対象とし、一定温度と温度上昇下でクリープ試験を行った。試験結果を示すととも既往の 3 つのクリープモデルにおける材料定数を実験結果から最小二乗法に基づいて決定した。クリープモデルによる予測値と実験値を比較した結果、よく一致することが認められた。次に、ひずみ硬化理論と藤本によるクリープモデルを用いた温度上昇下でのクリープひずみ予測方法を述べ、その予測値と実験値の比較を行った。その結果、実験結果にかなり顕著な過渡的クリープひずみの増加が認められ、モデルによる予測値とは一致しなかった。

キーワード: クリープ, PC 鋼棒, 高温クリープモデル, ひずみ硬化理論, 過渡ひずみ, プレストレス

1. はじめに

プレストレストコンクリート (以下 PC) 構造の耐火設計法については、「日本建築学会プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」(以下 PC 規準) 付録 9¹⁾ においてその耐火性について記しているが、表-1 のような PC 鋼材の許容平均温度を超えないために必要なコンクリートかぶり厚さを規定するに留まっている。より合理的な設計を行うことのできる性能評価型耐火設計法の開発が望まれる。しかし、PC 部材の耐火性能については情報の蓄積が少なく、これまでなされてきた研究は、PC 部材に用いられる高強度コンクリートが起こす爆裂に関する研究等、各材料の高温時の特性を検証した研究が主であり、PC 部材の高温時の挙動に関する研究は極端に少ない。また、PC 部材の耐火性能として、荷重を支持する能力はよく問題にされるが、たわみがどのようどの程度増加するかについてはほとんど調べられていない。性能評価型耐火設計法の開発には、このような高温下での PC 部材の変形および耐力の時刻歴を予測するモデルが必要である。その解析モデルを開発する際、あらかじめ PC 鋼材の高温挙動を定式化する必要がある。特に PC 梁は大きな常時荷重を支持し、長大スパンに使われることが多いことからたわみの予測は重要な検討項目で、高温クリープはその主な影響因子の一つである。本研究では定荷重クリープ試験機と管状加熱炉を用いた。PC 鋼棒(φ13mm)の高温クリープ試験について報告する。

2. 実験の概要

2.1 試験体

実験では直径 13mm の PC 鋼棒(SBPR1080/1230) 10 本を試験体として用いた。表-2 に示すように 10 本の試験体とも種類・寸法は同一である。鋼材の化学的性質お

よび機械的性質を表-3 および表-4 に示す。

表-1 PC 鋼材の許容平均温度(単位: °C)

建築物の部分	柱・梁	床
PC 鋼棒	450	500
PC 鋼線	350	400

表-2 試験体の種類と寸法

試験体	鋼種	直径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	全長 (mm)
SB1	C 種 1 号 SBPR1080/1230	φ 13	132.7	1250

表-3 試験体の化学的性質(%)

試験体	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
	× 100	× 100	× 100	× 1000	× 1000	× 100	× 100	× 100
SB1	35	161	68	11	3	1	1	1

表-4 試験体の機械的性質

試験体		降伏応力 f_y (MPa)	引張応力 f_u (MPa)	弾性係数 E_p (MPa)
SB1	規格値	1080 以上	1230 以上	20100 以上
	測定値	1229	1296	201000

2.2 試験条件

載荷と加熱の順序によって、一定温度下での静クリープ試験と、載荷後に温度上昇させる動クリープ試験を行った。表-5, 表-6 に静クリープ試験と動クリープ試験条件をそれぞれ示す。表に示す条件で高温クリープ試験を行い、その各温度における試験区間の伸びひずみを計測した。条件 1~6 は、一定温度、一定応力下でのクリ

*1 京都大学大学院 博士後期課程 修士 (工学) (正会員)

*2 京都大学 工学研究科 教授 博士 (工学) (正会員)

ープひずみと温度，時間の関係を調べた。また，条件 8～10 は，PC 鋼棒が PC 部材に用いられる状態を想定し，最初に降伏応力 f_y の 70%に相当する引張力を加えた後に温度上昇させながらクリープひずみと温度，時間の関係を調べた。条件 7 ではクリープの初期応力依存性を調べた。

表-5 静クリープ試験条件

条件番号	1	2	3	4	5	6	7
温度(°C)	300	250	200	150	100	20	300
所定応力	0.7 f_y						0.2 f_y
試験時間	載荷後4時間						
	所定温度になってから，載荷を開始						

表-6 動クリープ試験条件

条件番号	8	9	10
温度(°C)	300	200	100
所定応力	0.7 f_y		
試験時間	載荷後4時間		
	所定応力に達した後に加熱		

2.3 実験方法

本実験に用いたクリープ試験装置および加熱炉を写真-1，写真-2に示す。図-1に試験体設置状況を示す。電気炉内の鋼棒のクリープひずみを測定する際，試験体と同径，同材質のダミー鋼材を用いて熱膨張を相殺した。ひずみは，2つのダミー変位計による測定値の差を検長250mmで割って算出した。クリープひずみは，測定されたこの(上記)ひずみから載荷完了時の瞬間ひずみを差し引いた値とした。

炉内温度は，場所によってばらつきがあるため，ひずみ測定区間の中央とその上下75mmの位置において熱電対を用いて測定した。

PC 規準に記載の常温でのリラクセーション試験法に従い，200MPa/minの載荷応力速度で所定応力まで上昇させた。なお，PC 鋼棒の引張試験結果²⁾では PC 鋼棒が300°Cより高温となると，引張強度が急激に低下することが報告されている。このため最高設定温度を300°Cとした。温度は3°C/minの速度で所定温度まで上昇させた。

2.4 実験手順

静クリープ試験と動クリープ試験によって，載荷と加熱の順序が異なる。静クリープ試験は，載荷する前に所定温度まで加熱し，一定温度になってから所定応力まで載荷を行う。その後一定温度，一定応力下で4時間保持する。動クリープ試験では，加熱する前に所定荷重まで載荷し，その後所定温度まで加熱する。その後応力と温度を4時間保持する。それぞれの試験状態に関して時間



写真-1 クリープ試験機



写真-2 加熱炉

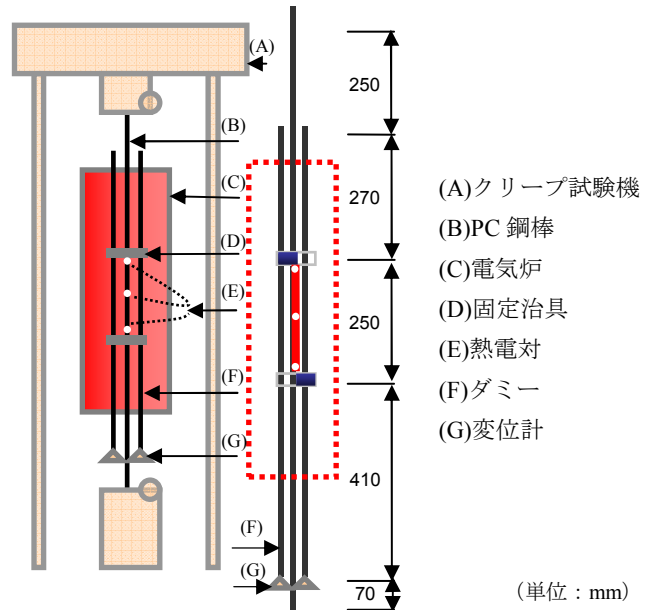


図-1 試験体設置状況

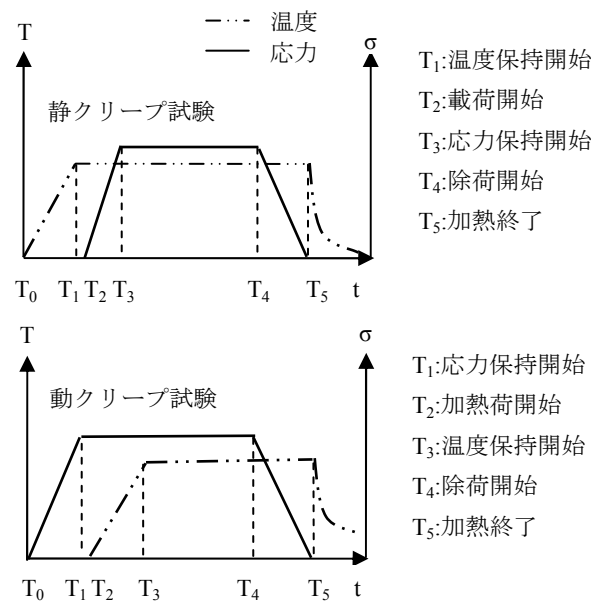


図-2 試験手順経過図

を横軸にとった温度と荷重の変化を図-2に模式的に示した。なお，表-7にその実験手順詳細を示す。

表-7 実験手順詳細

静クリープ試験	動クリープ試験
1) 所定温度まで加熱 (温度上昇速度 3°C/min)	1) 所定荷重まで載荷 (載荷速度 26.5kN/min)
2) 温度の安定のため保持 (15分)	2) クリープ計測開始 (4時間荷重維持)
3) 所定荷重まで載荷 (載荷速度 26.5kN/min)	3) 所定温度まで加熱 (温度上昇速度 3°C/min)
4) クリープ計測開始 (4時間荷重保持)	4) 所定温度を一定に維持
5) 除荷し, 自然冷却	5) 除荷し, 自然冷却
6) 試験終了	6) 試験終了

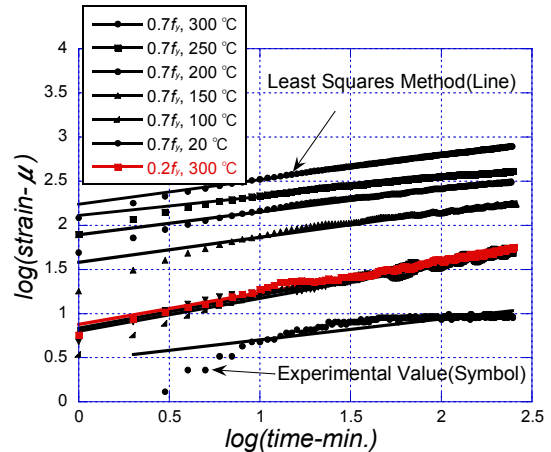


図-4 静クリープひずみと時間の影響

3. 実験結果

3.1 静クリープひずみ

図-3 に PC 鋼棒の静クリープ試験結果としてひずみと温度, 時間, 応力の関係を示す。PC 鋼棒のクリープひずみは, 100°Cまではほとんど増加しないが, 250°Cを超えると急激に増加する。

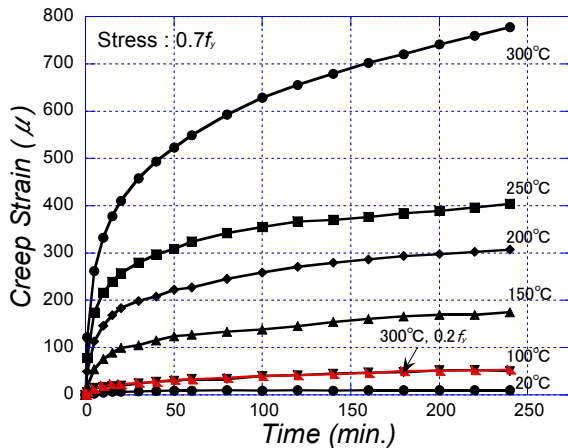


図-3 静クリープひずみに対する温度, 時間, 応力の影響

3.2 静クリープひずみに対する時間の影響

図-4 はクリープひずみに対する時間の影響を各温度に対して示したものである。各温度でのクリープひずみの対数値は, 時間の対数値とほぼ直線関係がある。また, 各温度の回帰直線はほぼ平行である。したがって, クリープひずみと時間との関係を式で表すと

$$\log(\epsilon_p) = a + b \log(t) \quad (1)$$

となる。ここで ϵ_p と t は, それぞれクリープひずみと時間で, a と b は設定温度と応力によって定まる材料定数である。表-8 に最小二乗法を用いて求めた材料定数を示す。

表-8 材料定数

温度 (°C)	20	100	150	200	250	300	300
応力 (MPa)	756 (0.7f _y)						216 (0.2f _y)
a	0.36	0.83	1.71	1.99	2.11	2.24	0.99
b	0.29	0.38	0.25	0.23	0.21	0.28	0.32

3.3 静クリープひずみに対する温度の影響

図-5 は, クリープひずみに対する温度の影響を応力保持時間により示したものである。PC 鋼棒のクリープひずみは, 100°Cから 250°Cまではほぼ直線的に増加し, 250°C以降に増加量が大きくなる。また, 最初の 60 分で大部分のクリープひずみが生じている。

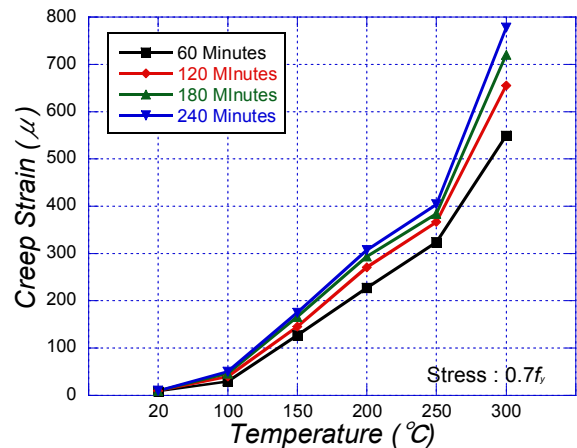


図-5 静クリープひずみと温度の影響

3.4 動クリープひずみ

図-6 に PC 鋼棒の動クリープ試験結果としてひずみと温度, 時間の関係を示す。図中の原点は載荷終了後に加熱開始点である。なお, 左側の縦軸はクリープひずみを, 右側の縦軸は温度を表している。参考文献⁵⁾の実験

結果からも温度変動下のクリープにおいてかなり顕著なクリープひずみあるいはクリープ速度の増加が認められている。なお、100℃と200℃では所定温度に達して以後はほとんどひずみが増加しない。

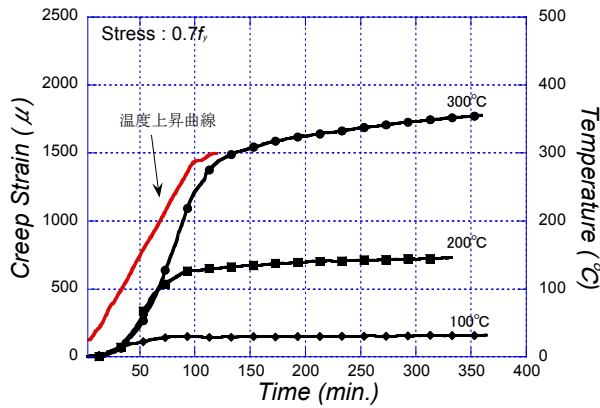


図-6 動クリープひずみに対する時間と温度の影響

4. 既往の高温クリープモデルによる検討

4.1 Norton-Bailey モデル

一般的に金属の第一期クリープひずみ ϵ は応力 σ 、時間 t 、温度 T の関数として下式のように表示される。

$$\epsilon = f_1(\sigma) \cdot f_2(t) \cdot f_3(T) \quad (2)$$

Norton-Bailey モデルに用いられた応力 σ 、時間 t 、温度 T の各式を以下の式(3)~(5)に示す。

$$\text{応力依存式 } f_1(\sigma) = a\sigma^n \quad (3)$$

$$\text{時間依存式 } f_2(t) = bt^m \quad (4)$$

a, b, m, n は材料定数である。

クリープひずみは熱活性化過程によって進行するが、その変形の間、同時にいくつかの変形機構が共存し、それぞれの機構は Arrhenius の法則に従い、温度に依存する。Arrhenius の法則は以下のような関係式で表される。

$$\text{温度依存式 } f_3(T) = c \cdot \exp(-R/T) \quad (5)$$

ここで、 c は材料定数で、 T は絶対温度である。 R は活性化エネルギーと Boltzmann 定数の比である。 R は材料によって異なるだけでなく、負荷応力、負荷時間、ならびに試験温度によっても変化されると言われるが、負荷応力が一定、4 時間以内の応力保持期間、かつ 650℃以下という条件の下に、近似的に定数であると考えられる。

以上のことからクリープ予測式は、最も簡単な形式の式(6)となる。

$$\epsilon_p = B \exp(-R/T) t^m \sigma^n \quad (6)$$

ここで、 B, R, m, n は材料定数である。試験結果から最小二乗法を用いて求めた材料定数を表-9 に示す。これらの材料定数を Norton-Bailey モデルに代入し、実験値と比較した結果を図-7 に示す。

表-9 Norton-Bailey モデルにおける材料定数

鋼種	B	R	m	n
C 種 1 号 SBPR 1080/1230	1.43×10^{-7}	2315.84	0.26	1.69

(σ の単位は MPa)

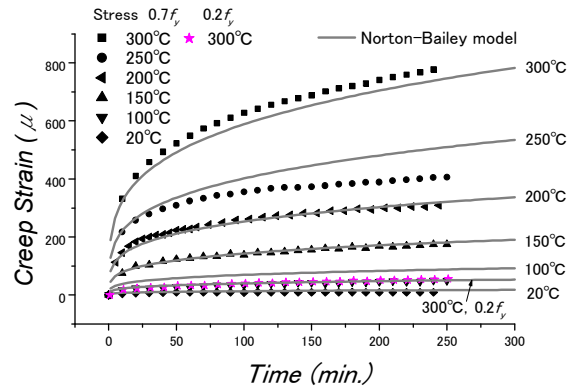


図-7 Norton-Bailey モデルと静クリープ実験結果の比較

表-10 Harmathy モデルにおける材料定数

鋼種	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
C 種 1 号 SBPR 1080/1230	2.10 $\times 10^{-10}$	2.30	2.30 $\times 10^{-3}$	2.01	6295.36

(σ の単位は MPa)

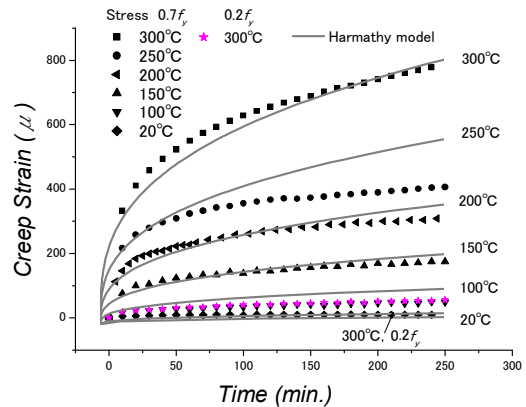


図-8 Harmathy モデルと静クリープ実験結果の比較

4.2 Harmathy モデル

このモデルは Harmathy により Dorn クリープ理論に基づいて提案された。そのモデルは式(7)のようになる。

$$\dot{\epsilon} = b_1 \cdot \coth^2(b_2 \cdot \epsilon) \quad (7)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ はクリープひずみ速度で、 ϵ はクリープひずみである。 b_1, b_2 は温度と応力の関数で、次式で与えられる。

$$b_1 = c_1 \cdot \exp(c_2 \ln \sigma - c_3 / T) \quad (8)$$

$$b_2 = 1 / c_3 \sigma^{c_4}$$

ここで、 $c_1 \sim c_4$ は材料によって決まる定数である。クリープひずみと時間の関係を得るためには、式(7)を時間について積分しなければならない。参考文献⁴⁾によると、積分結果は下式で与えられる。

$$b_2 \varepsilon - \tanh(b_2 \varepsilon) = b_1 b_2 t \quad (9)$$

式(9)と試験結果から最小二乗法を用いて求めた材料定数を表-10に示す。これらの材料定数を Harmathy モデルに代入し、実験値と比較した結果を図-8に示す。

4.3 藤本モデル

本モデルは、藤本らが行った一定温度、一定荷重下でのクリープ試験結果に基づいて提案されたものである。試験は、3種類の構造用鋼材 SS41, SM50A, SM58Q を使用し、350℃~600℃の温度範囲において 25℃間隔で行われた。また、各温度において作用させた応力は、3~5段階に設定されている。このモデルは式(10)で与えられる。

$$\varepsilon_c = \frac{10^4 \sigma^B t^n}{100} \quad (10)$$

ここで、 σ は応力(kg/mm²)、 t は载荷時間(分)である。また、 A, B, n はそれぞれ絶対温度 T の関数で式(11)~(13)で与える。

$$A = (a/T) + b \quad (11)$$

$$B = (c/T) + d \quad (12)$$

$$n = e \cdot T + f \quad (13)$$

式(11)~(13)における a, b, c, d, e, f は鋼種によって決まる定数である。式(10)と試験結果から最小二乗法を用いて求めた材料定数を表-11に示す。これらの材料定数を藤本モデルに代入し、実験値と比較した結果を図-9に示す。

表-11 藤本モデルにおける材料定数

鋼種	a	b	c	d	e	f
C種1号						
SBPR	1503.		-7.93	3.53	4.80	2.69
1080/1230	98	-10.59	$\times 10^2$		$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-3}$

(σ の単位はMPa)

4.4 モデル比較

3つのモデルにより求めたPC鋼棒のクリープひずみ曲線と実験結果との比較を図-10に示す。

図に示すように、常温から300℃まで温度範囲におけるPC鋼棒のクリープひずみに対する、時間と温度の影響は3つのモデルで近似することができる。その中でも、藤本モデルと Norton-Bailey モデルは、200℃以下では実験結果とよく一致している。また、藤本モデルは、他のモデルに比べて300℃での予測値と実験値がよく一致する。しかしながら、250℃では3つのモデルとも実験値との差が大きい。

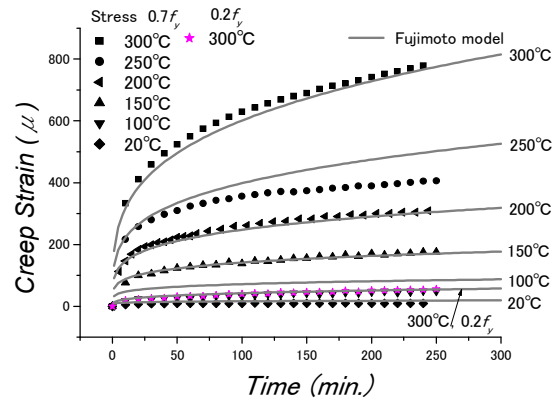


図-9 藤本モデルと静クリープ実験結果の比較

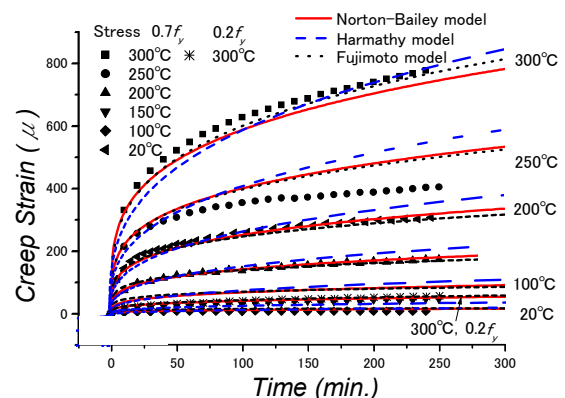


図-10 3つのモデルと実験値の比較

5. 温度変動下におけるクリープひずみ予測

5.1 ひずみ硬化理論と時間硬化理論

一般的に一定応力、温度変動下でのクリープ挙動の予測に用いられる理論としてひずみ硬化理論と時間硬化理論がある。⁶⁾ 応力、温度、ひずみを変数とするクリープ速度式がひずみ硬化理論と呼ばれ、応力、温度、時間を変数とするクリープ速度式は、時間硬化理論と呼ばれる。このひずみ硬化理論と時間硬化理論について図-11に示す。図には、一定応力下での一定温度 T_1, T_2 におけるクリープ曲線を示している。たとえば、時間 t_1 において突然温度が T_1 から $T_2 (T_2 > T_1)$ に変動したとすると、ひずみ硬化理論では、D点のクリープひずみは変わらない

まま、A 点に移動し、 T_2 のクリープ曲線を従うことになる。すなわち、経路 ODAC に基づき、温度変化後のクリープひずみ曲線は経路 ODE になる。一方、時間硬化理論では、D 点の時間が変わらないまま、B 点に移動し、 T_2 のクリープ曲線を従うことになる。すなわち、経路 ODBC に基づき、温度変化後のクリープひずみ曲線は経路 ODF になる。

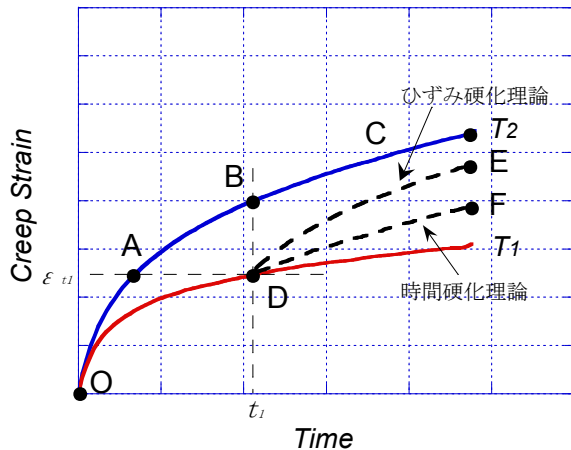


図-11 ひずみ硬化理論と時間硬化理論

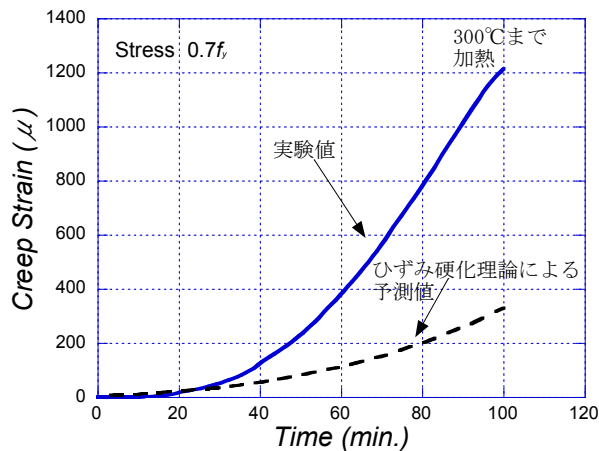


図-12 温度変動下における実験値と予測値の比較

5.2 動クリープひずみ実験値と予測値の比較

鋼構造の高温クリープ挙動に関する既往研究⁸⁾において時間硬化理論よりひずみ硬化理論の方が予測精度が高いと言われていたことから、今回の予測にはひずみ硬化理論を用いる。なお、クリープ予測に用いるモデルは藤本モデルである。予測値と実験値の比較を図-12に示す。図から、クリープ試験値と予測値の差が大きいことが分かる。既往の文献⁵⁾によると応力を受ける鋼材には、通常の高温クリープひずみ以外にも過渡ひずみが生じるとされており、今回の実験値でも過渡ひずみが含まれたため、このような差が生じたものと推察される。

6. 結論

本研究では PC 鋼棒の高温クリープ性状を把握するために高温クリープ試験を行い、その結果に基づき、高温クリープひずみ予測モデルを示した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 一定応力、一定温度下での PC 鋼棒のクリープひずみの時間、温度、応力の関係を示した。
- 2) 実験の結果から 3 つのクリープモデル(Norton-Bailey, Harmathy, 藤本)における PC 鋼棒の材料定数を提案した。
- 3) PC 鋼棒において常温から 300℃までのクリープ曲線は上記 3 モデルを用いることで予測可能である。中でも、藤本モデルと Norton-Bailey モデルによる予測値は、200℃以下では実験値とよく一致している。しかしながら、250℃では 3 つのモデルとも実験値と差が見られた。
- 4) 温度変動下におけるクリープ試験を行い、ひずみ硬化理論と藤本モデルを用いた予測値と比較したところ実験値と大きく異なった。

謝辞

PC 鋼材と実験施設を提供して頂いた高周波熱錬(株)及び本研究に尽力された元京都大学大学院生 董 建峰氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会:プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、付 9. プレストレストコンクリートの耐火性、pp.463-473, 1998
- 2) 伊藤ほか: PC 鋼棒の高温下における引張試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.49-50, 2005
- 3) 平ほか: クリープにおける温度履歴の影響、日本機械学会論文集(第1部)、pp.373-380, 1951
- 4) T. Z. Harmathy: A Comprehensive Creep Model, Tran. of ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.89, Series D. No.3, 1967
- 5) ASTM, STP.: Symposium of Effect of Cyclic Heating and Stressing on Metals at Elevated Temperature, No.165, 1954
- 6) Kraus, H.: Creep Analysis. John Wiley&Sons, NewYork, 1980
- 7) Penny, R. K., Marriott: Design for Creep, Chapman&Hall, London, D.L., 1995
- 8) 藤本ほか: 高温における建築用鋼材の第一期クリープに関する実験(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.2149-2150, 1978