

高温時における PC スtrandの力学的性状のモデル化に関する研究

MODELING MECHANICAL PROPERTIES OF PRESTRESSING STEEL STRAND AT ELEVATED TEMPERATURE

林 成 俊*, 西山峰広**, 原田和典**, 谷 昌典***
Sungjun LIM, Minehiro NISHIYAMA, Kazunori HARADA
and Masanori TANI

The purpose of this paper is to model mechanical properties of prestressing strand at elevated temperature for estimating the strength and deflection of prestressed concrete members during fire and/or after fire. Prestressing strands(SWPR7BL) of 12.7 mm in diameter were used as test coupons. Tensile tests on prestressing strands at elevated temperatures were conducted to investigate mechanical properties such as yield strength, Young's modulus and creep strain. Reduction in yield strength, Young's modulus and stress-strain curves at elevated temperature were formulated. Creep tests were conducted on prestressing strands. The initial stress applied was 70% of the yield strength. The maximum creep strain was as large as 545 microns at 250°C. Creep behavior of prestressing strands was approximated by a numerical formula proposed by Norton and Bailey. Using the formula together with time-hardening rule, an estimation method of relaxation of prestressing steel at high temperatures was proposed.

Keywords : *Prestress, Prestressing steel strand, Creep, Fire, Deflection, Stress-strain relationship, Relaxation*

プレストレス, PC スtrand, クリープ, 火災, たわみ, リラクゼーション

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標準・同解説」（以下 PC 規準）の付録 9 に記述があり、表 1 に示すように 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のかぶり厚さが規定されている。このようなかぶり厚さを規定する仕様設計では、個々の建物の実状に応じて火災温度時間曲線を定め、その加熱条件に応じて部材の耐火性能を明示的に設計することが難しい。また、火災後の修復性も明確にはならない。

表1 PC 鋼材の許容平均温度¹⁾(単位: °C)

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

PC 部材は、高強度鋼材を用いて部材に圧縮力を与えることでコンクリートに生ずる引張応力を低減あるいは相殺する。そのため、火災時に高温により PC 鋼材の強度が大きく低下した場合には、荷重により PC 鋼材が破断し、部材の崩壊につながる可能性がある。PC 鋼材のような高強度鋼材は熱による強度低下が、普通強度鉄筋に比べて大きいと言われている²⁾。この問題に対して西山らは、骨組中の梁部材として両端固定梁を想定すれば、荷重係数を 1.7 として終局強度設計を行えば、火災により梁中央部での曲げ耐力が失われて

も、常時荷重(G+P)を支持できることを示した³⁾。しかしながら、骨組中の梁部材が崩壊まで達しなくても部材に大きなたわみが生じる場合がある。PC 部材は通常、PC 鋼材の再緊張によってその性能（耐力、変形）を回復したり、部分的に修復したりすることが難しいことから、火災後の再使用を視野に入れて部材たわみに基づく耐火設計を行っておく必要がある。

たわみに影響を与える要因としては、温度分布、材料の剛性低下、PC 鋼材の伸び、爆裂などの部材断面欠損による剛性低下が挙げられる。PC 部材の構成材料であるコンクリート、普通強度鉄筋の力学的性質は実験に基づきモデルや評価式が提案されている⁴⁾。しかしながら、高強度鋼材である PC 鋼材の高温時特性に関する研究は乏しいのが現状である。

火災により高温を受ける梁部材内の PC 鋼材は高温クリープひずみが生じるとともにその力学的性状が変化する。筆者らは文献5)において PC 鋼材のクリープひずみが部材たわみに及ぼす影響を解析的に検討した。その結果、クリープひずみが増加するとともに部材たわみも急激に増加しており、大きな影響を与えることを確認した。また、一定応力下で温度が上昇すると、鋼材の強度が低下し続け、降伏および破断に至る。この場合には、プレストレス力が急激に低下し、部材の耐力および変形は限界に近い状態となる。

本研究の目的は、火災時および火災後における PC 部材の強度と変形を評価するために必要となる PC スtrandの高温時力学的性状を実験により把握し、モデル化することにある。本稿では、材料の

* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
大学院生・修士(工学)

** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)

*** 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 助教・博士(工学)

Graduate Student, Dept. of Architecture, Kyoto University, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Kyoto University, Dr. Eng.

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Kobe University, Dr. Eng.

ヤング係数の温度による変化に対する降伏応力の温度による変化の比 $\sigma_y(T)/E(T)$ が低下する温度域を高温と定義している⁹⁾。はじめに、高温での引張試験を実施し、PC ストランドの応力ひずみ関係、降伏強度、ヤング係数を把握し、これらの評価式を提案する。次に、定常、非定常におけるクリープ試験をそれぞれ行い、実験データに基づいたモデル化および火災時クリープひずみの予測方法について述べる。最後に、高温時 PC 鋼材のリラクセーションの予測方法を述べ、文献 7) のデータと比較することで妥当性を確認する。

2. 高温時の PC 鋼材の構成則

常時荷重を受ける PC 梁部材が火災を受けると PC 鋼材は引張力が作用した状態で加熱される。この時の PC 鋼材のひずみには応力ひずみだけでなく、式(1)に示すような高温クリープひずみおよび熱膨張ひずみを考慮しなければならない。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_\sigma(\sigma, T) + \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_\alpha(\sigma, T, t) \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_\sigma(\sigma, T)$ は応力 σ によるひずみ、 $\varepsilon_{th}(T)$ は熱膨張ひずみ、 $\varepsilon_\alpha(\sigma, T, t)$ はクリープひずみである。 T は温度、 t は時間である。

本研究では、式(1)の応力ひずみとクリープひずみを、測定してモデル化する。一方、熱膨張ひずみに関しては PC 鋼棒、ストランド（より線）に関らず、温度が 1°C 上昇するにあたって 14 μ 増加するとされているので⁸⁾、本研究では熱膨張ひずみの測定は行わなかった。

3. PC ストランドの高温引張試験

3.1 PC 鋼材の高温時力学的性状についての基規準および既往の研究

鋼構造耐火設計指針⁹⁾や Eurocode 3⁸⁾には構造用鋼材、Eurocode 2¹⁰⁾には鉄筋や PC 鋼材の高温強度の測定結果がモデル化されている。また、BS8110、AS3600 および NZ3101 では、鉄筋コンクリート用棒鋼と PC 鋼材に対して、常温時降伏強度との比 $k_{y,T}$ をそれぞれ式(2)および(3)で与えている。なお、 $k_{y,T}$ が 1 を超える場合は 1 となる。

また、西山らは PC 鋼棒 SBPR1080/1230 を対象に引張試験を行い、PC 鋼棒に対する降伏強度評価式として式(4)~(6)を提案した³⁾。このモデルは、200°C 以下において降伏強度を過大評価してしまう BS8110、AS3600 および NZ3101 の設計式を改善したものである。

ヤング係数の評価式としては、式(7)~(8)に示す AS400・NZS3404 提案式がある。ここで、 T は温度(°C)である。

$$k_{y,T} = \frac{720 - T}{470} \quad (\text{鉄筋コンクリート用棒鋼}) \quad (2)$$

$$k_{y,T} = \frac{700 - T}{550} \quad (\text{PC 鋼材}) \quad (3)$$

$$k_{y,T} = 1.0 \quad (0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}) \quad (4)$$

$$k_{y,T} = \frac{1220 - T}{1200} \quad (20^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C}) \quad (5)$$

$$k_{y,T} = \frac{700 - T}{550} \quad (400^\circ\text{C} < T) \quad (6)$$

$$k_{E,T} = 1.0 + \frac{T}{2000 \ln(T/1100)} \quad (0^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C}) \quad (7)$$

$$k_{E,T} = \frac{690(1-T/1000)}{(T-53.5)} \quad (600^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C}) \quad (8)$$

3.2 PC ストランド引張試験

鋼構造用鋼材や普通強度鉄筋の高温引張試験の事例が増えているものの、ストランドの高温引張試験の事例は非常に少ない。そこで、本研究では限られた鋼材に対してではあるが、高温時引張試験を実施した。試験体には、表 2 に示すように公称径 12.7mm の PC ストランド SWPR7BL（スチールワイヤ 7 本より線 B 種低リラクセーション材）を用いた。一定の張力あるいは一定の塑性ひずみを加えた状態での熱処理を行ったもの（ストレッチング処理）である。表 3 および 4 に試験体の機械的性質および化学的性質をそれぞれ示す。

表2 試験体の種類と寸法

試験体	鋼種	公称径(mm)	公称断面積(mm ²)
SW1	SWPR7BL	φ 12.7	98.71

表3 試験体の機械的性質

試験体		降伏応力 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)	ヤング係数 E_p (GPa)
SW1	規格値	1580 以上	1854 以上	-
	測定値	1810	1854	199.90

表4 試験体の化学的性質(%)

試験体	C	Si	Mn	P	S	Cu
SW1	0.85	0.26	0.76	0.012	0.008	0.01

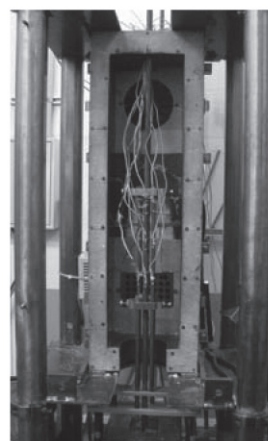


図 1(a) 加熱炉の内部

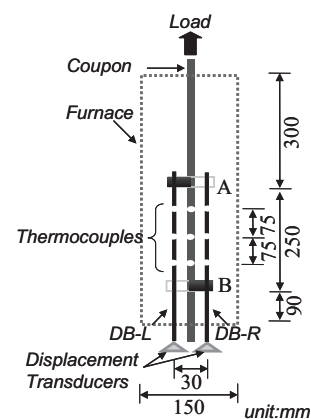


図 1(b) ひずみ測定治具

図 1 試験体設置状況

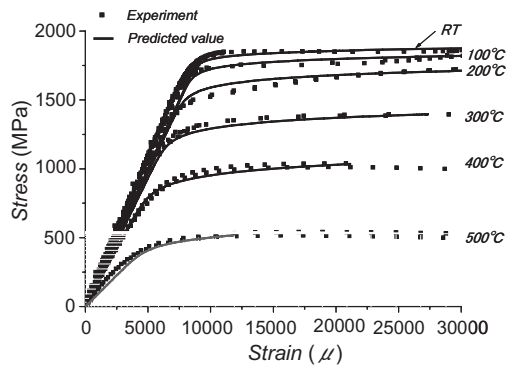


図2 各温度における応力-ひずみ関係

実験パラメータは鋼材温度とし、常温、100、200、300、400、500°C の6条件における一定温度下での応力-ひずみ曲線を得た。図1に示すような加熱炉および測定用治具を用いて実験を行った。試験体の上下それぞれに試験体と同材質の鋼棒を取り付け、応力の作用しないこれら2本の鋼棒の伸びの差を検長250mmで除すことで試験体の応力ひずみを算定した。このことにより試験体の熱膨張ひずみを測定値から除くことができる。各試験温度について2本ずつ計12本の試験を行った。ストランドの温度はひずみ測定区間の中央とその上下75mmの位置でCA熱電対により測定した。また、ダミー鋼棒においても試験体と同様な位置で温度測定を行い、横方向の炉内温度差を調べた。ひずみ測定治具は、試験前に炉内温度分布を把握し、温度のばらつきが最も小さい位置に取り付けた。

载荷には、万能試験機を使用し、鋼材の加熱には小型加熱炉を用いた。载荷速度は、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」を参考に0.93kN/sを目標値とした。温度上昇速度は、目標温度よりも20°C低い温度までは5°C/min、その後目標温度までは2°C/minとし、最終的には鋼材表面温度が目標温度で保持されるように制御した。炉内温度の安定のために15分間所定の温度を保持した後、载荷を行った。

すべての試験条件において試験体長さ方向の温度差は、温度上昇時には±5°C以内であったが、目標温度に達してから15分間所定温度を保持すると±1°C以内となった。なお、試験体とダミー鋼材の温度差は、すべて±1°C以内であった。PC鋼材が破断すると治具が破壊する恐れがあったため、鋼材ひずみが3%に到達した時点で除荷した。

3.3 試験結果

図2に高温引張試験から得られた応力-ひずみ関係を示す。図よりストランドの降伏強度(0.2%オフセット)実験値は、200°Cまでは温度の上昇とともに緩やかに低下していくが、300°Cから500°Cの間で大きく低下する。また、ヤング係数は300°Cまでほぼ同様であるが、400°Cから大きく低下し始める。300、400、500°Cにおいては、ひずみがそれぞれ2.7、2.1、1.2%に達したとき強度低下を起こし、ひずみ軟化が生じる。なお、試験結果のばらつきが非常に小さい。

3.4 高温時ヤング係数のモデル化

図3にヤング係数の求め方を示す。引張試験で载荷を行う際に、万能試験機のつかみ装置部が試験体を完全に掴むまで少しすべりが

生じる。無視できるほどの小さい値であるが、この分のひずみ ε_1 を除外した。図に示すようにヤング係数は、各温度の降伏応力に対する1/3の点 a_2 と、すべりを除外した点 a_1 ($\sigma \approx 0$)を結んだ線の傾きから定めた。図4に高温引張試験結果から得られたヤング係数の低下率を示す。

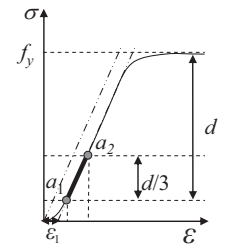


図3 ヤング係数の求め方

また、図中には式(7)~(8)に示すよう

なAS400・NZS3404に提案されているモデルとPC鋼棒の高温引張試験結果¹¹⁾も併せて示している。図に示すようにAS400・NZS3404のモデルは、400°C以上では過大評価となってしまいます。そのために、式(7)~(8)を式(9)~(10)に示すような式(図4の実線)に修正する。

$$k_{E,T} = 1.0 + \frac{T}{7500 \ln(T/550)} \quad (0^\circ\text{C} < T \leq 480^\circ\text{C}) \quad (9)$$

$$k_{E,T} = \frac{690(1-T/800)}{(1.25T-53.5)} \quad (480^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C}) \quad (10)$$

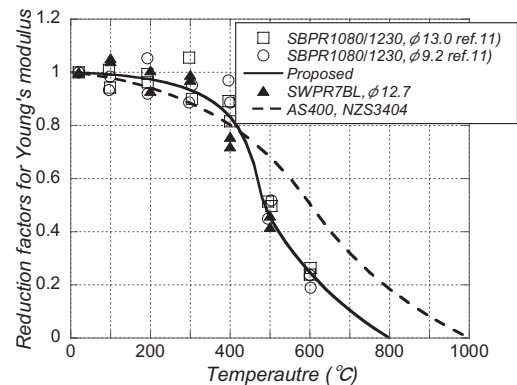


図4 ヤング係数の低下

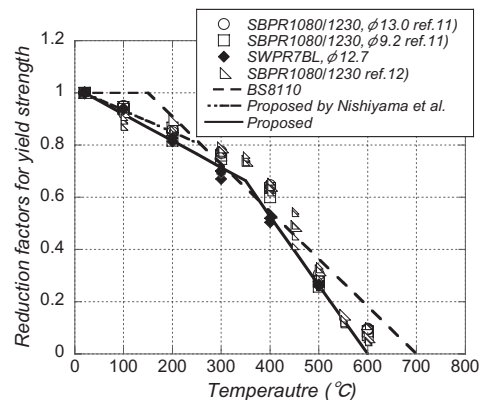


図5 降伏強度の低下

3.5 高温時強度の定式化

図5にPCストランドにおける高温時降伏強度(0.2%オフセット)の低下率と鋼材温度の関係を示す。図中には、PC鋼棒の実験結果¹¹⁾および日本鋼構造協会でまとめられた文献資料¹²⁾からPC鋼棒SBPR1080/1230のデータも併せて示している。また、BS8110の式(3)

および PC 鋼棒 SBPR1080/1230 の式(4)~(6)も併記した。

図より、300~400℃ 付近のみであるが、ストランドの降伏強度低下は、鋼棒よりも大きい。なお、図に示されるように PC 鋼棒 SBPR 1080/1230 の式(4)~(6)は、500~600℃ の間では強度を過大に評価してしまう。これを回避するため、式(11)~(13)を提案する。

$$k_{y,T} = 1.0 \quad (0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}) \quad (11)$$

$$k_{y,T} = \frac{1000 - T}{980} \quad (20^\circ\text{C} < T \leq 350^\circ\text{C}) \quad (12)$$

$$k_{y,T} = \frac{600 - T}{380} \quad (350^\circ\text{C} < T) \quad (13)$$

3.6 応力-ひずみ関係のモデル化

金属材料の応力-ひずみ関係の定式化で広く用いられるものとして Ramberg-Osgood 則¹³⁾がある。このモデルは、全ひずみを弾性ひずみと塑性ひずみの和として表現するものである。

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{inel} \quad (14)$$

ここで、弾性ひずみ ε_{el} は $\sigma/E(T)$ で、塑性ひずみ $\varepsilon_{inel} = (\sigma/\sigma_k)^k$ である。また、 σ は負荷応力、 σ_k と k は塑性ひずみを定める定数、 $E(T)$ はヤング係数であり、温度 T に依存する。ヤング係数の温度依存性には、式(9)~(10)に示す AS400、NZS3404 の修正式を用いた。実験結果から最小二乗法により諸定数を算出した結果を表5に、試験結果と式(14)の比較を図2に示す。図から、実験値と式(14)のモデルが良く対応していることが分かる。

表5 諸定数の近似結果

温度	σ_k	k	$E(T)$ (GPa)
20℃	1854.23	69.21	199.9
100℃	1786.50	51.51	198.3
200℃	1673.11	33.10	194.6
300℃	1356.53	23.91	186.7
400℃	1007.50	15.10	166.4
500℃	540.81	10.62	90.5

$$k = 75.114 \cdot e^{-0.003938T} \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C} \quad (15)$$

$$\sigma_k = -0.0054T^2 + 0.0452T + 1855.5 \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C} \quad (16)$$

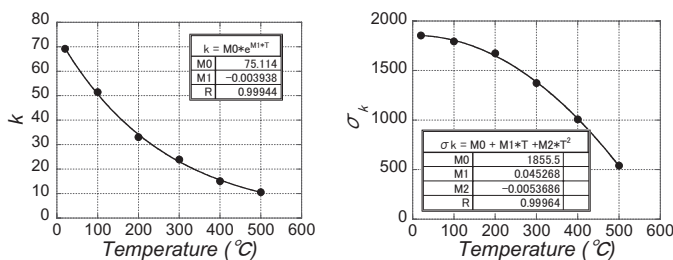


図6 諸定数と温度関係

表5に示した諸定数 σ_k および k と温度関係を図6に示す。図に示すようにこれらの関係はそれぞれ指数曲線および2次曲線で近似できる。近似式を式(15)~(16)に示す。ただし、本モデルは、応力に対してひずみが単調増加関数であり、引張強度後の強度低下は表現されない。図に示すように 300, 400, 500℃ においてはひずみがそれぞれ 2.7, 2.1, 1.2%に達した以後は、式(14)では正しく表すことはできない。

4. PC ストランドの高温クリープ試験

4.1 試験概要

高温クリープ試験では、高温引張試験と同じく公称径 12.7mm の PC ストランド(SWPR7BL)15 本を用いた。試験条件を表6および7に示す。

条件1~6は、PC ストランドの基本的なクリープ特性を得るために、一定温度、一定応力下でのクリープひずみと温度、時間の関係を調べた。また、条件9~13はPC ストランドが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(温度変動)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, 8, 14, 15ではクリープの初期応力依存性を調べた。以下では、一定温度下におけるクリープ試験を定常クリープ試験、温度変動下におけるクリープ試験を非定常クリープ試験と略す。

表6 定常クリープ試験条件

条件番号	1	2	3	4	5	6	7	8
温度(℃)	250	230	200	150	100	20	250	250
所定応力	0.7 f_y						0.5 f_y	0.3 f_y
試験時間	載荷終了後4時間							
	所定温度になってから、載荷を開始							

表7 非定常クリープ試験条件

条件番号	9	10	11	12	13	14	15
温度(℃)	250	200	150	100	50	250	250
所定応力	0.7 f_y					0.5 f_y	0.3 f_y
試験時間	載荷終了後4時間						
	所定応力に達した後に加熱						

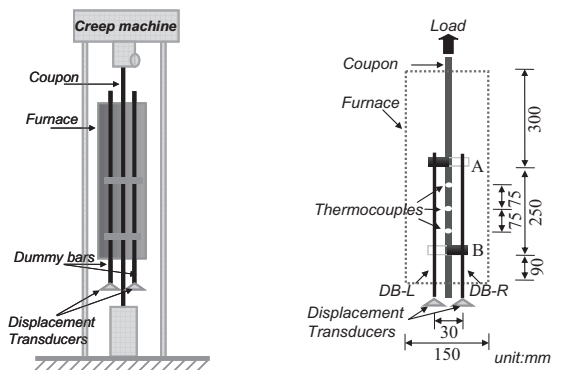


図7 試験体設置状況

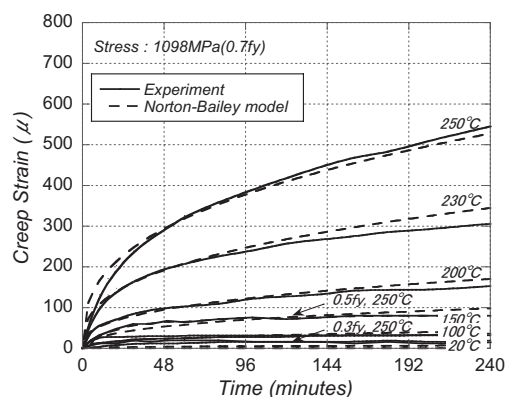


図8 定常クリープ試験における
クリープひずみと時間、温度、応力の関係

試験装置は、クリープ試験機と加熱炉を組み合わせたものであり、クリープひずみの測定には、図2と同様の加熱炉と測定治具を用いた。図7に試験体設置状況を示す。無応力の鋼材 DB-L と DB-R には試験体と同材質の鋼材を用いた。これは、試験中に生じる熱膨張を相殺するためである。さらに、クリープひずみ補正のためにクリープ試験と同様な温度履歴下において試験体に応力を加えない試験も併せて行った。クリープひずみは、測定されたひずみから載荷完了時の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温度測定を行った。載荷応力速度は、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 とした。ストランドの引張強度は、250°C の高温では大幅に低下する¹⁴⁾。このため作用応力による破断の危険があり、最高目標温度を 250°C とした。

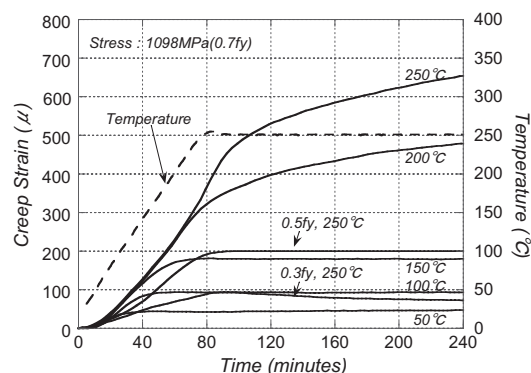


図9 非定常クリープ試験における
クリープひずみと時間、温度、応力の関係

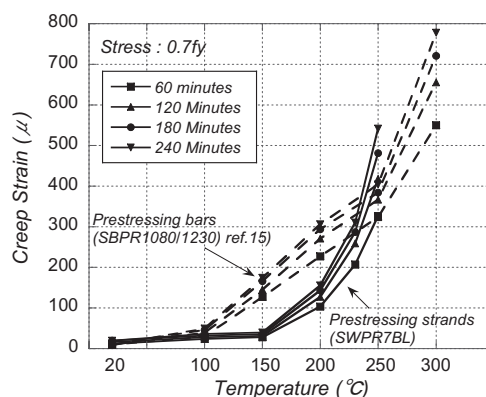


図10 クリープひずみと時間、温度の関係

場合、目標温度到達時試験体の長さ方向の温度差は、 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内であった。目標温度に達してから 15 分間温度を保持するとその差は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内となった。

4.2 試験結果

図8に定常クリープ試験におけるクリープひずみと時間、温度および応力の関係を示す。クリープひずみは、150°C まではほとんど増加しないが、200°C を超えると急激に増加し、250°C において最大 545μ となった。なお、クリープ試験開始後 60 分を越えると、全ての設定温度でクリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ がほぼ一定となった。一方、図9に非定常クリープ試験におけるクリープひずみと時間、温度および応力の関係を示す。図中の原点は載荷終了後の加熱開始点であり、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。温度は、測定された時点（時間）における3点の温度測定値の平均値である。150°C までは目標温度に達するとクリープひずみはほとんど増えないが、200°C となると目標温度に達してからもクリープひずみが徐々に増加し、最大で 650μ となった。

図10は定常クリープ試験結果においてクリープひずみと温度の関係を継続時間 $t=60, 120, 180, 240$ 分により示したものである。図中には、筆者らが行った PC 鋼棒のクリープ試験結果¹⁵⁾も併せて示す。図に示すように PC 鋼棒のクリープひずみは、100°C から 250°C までほぼ直線的に増加し、250°C 以上になると急激に増加する。一方、PC ストランドのクリープひずみは常温から 150°C まで、ほとんど変

表8 詳細な試験手順

定常クリープ	非定常クリープ
1) 所定温度まで加熱 (温度上昇速度 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	1) 所定荷重まで載荷 (載荷速度 $19.7\text{ kN}/\text{min}$)
2) 温度の安定のため保持 (保持時間 15 分)	2) クリープ計測開始 (荷重保持)
3) 所定荷重まで載荷 (載荷速度 $19.7\text{ kN}/\text{min}$)	3) 所定温度まで加熱 (温度上昇速度 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
4) クリープ計測開始	4) 温度を一定に維持
5) 荷重保持 4 時間後、除荷	5) 計測開始 4 時間後、除荷
6) 自然冷却	6) 自然冷却
7) 試験終了	7) 試験終了

試験条件 1~8 は、載荷する前に所定温度まで $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の速度で加熱し、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 時間保持した。試験条件 9~15 は、加熱する前に所定荷重まで載荷し、その後 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の温度上昇速度で加熱する。所定温度に到達した後は、温度を所定時間保持し、自然冷却した。各条件において一貫して試験を行った。詳細な試験手順を表8に示す。目標温度 250°C 以下に対して $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の速度で加熱した

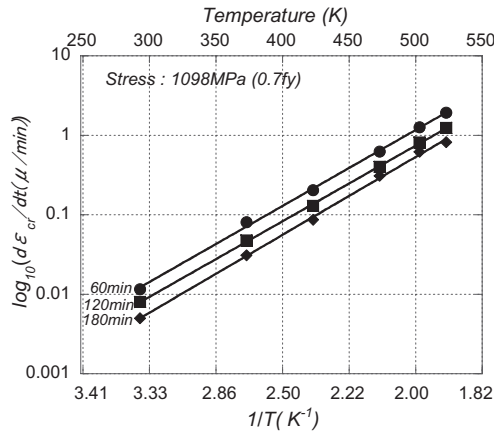


図 11 クリープひずみ速度と温度の関係

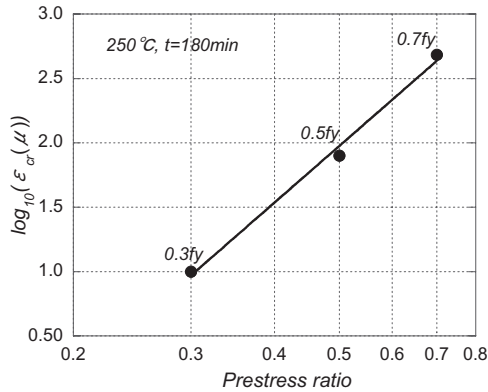


図 13 クリープひずみと導入応力の関係

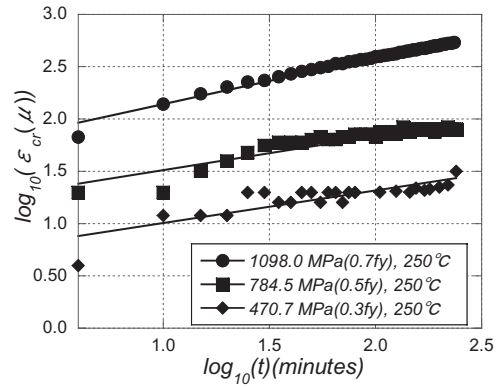


図 12 クリープひずみと時間、温度の関係

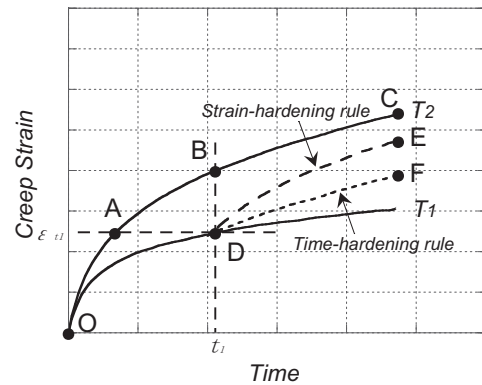


図 14 時間硬化則とひずみ硬化則

化しない。その後、200℃ から急激に増加し、250℃ 以上になると PC 鋼棒より大きくなる。

これは、鋼材の組織および化学組成の違いによるものと考えられる。クリープ挙動は転位に依存し、組織の種類によって転位密度および転位の移動量が異なる。図 10 に示す PC 鋼棒は、熱処理を行ったマルテンサイト組織、PC スtrand は、冷間伸線加工材のパーライト組織である。また、ケイ素(Si)は、その量が増すとリラクセーション(もしくはクリープひずみ)が小さくなると報告されている¹⁶⁾。PC 鋼棒には 1.61%、PC スtrand には 0.26% のケイ素が含まれている。

4.3 クリープひずみのモデル化

定常状態における金属の高温クリープモデルは、応力 σ (MPa)、時間 t (min.)、温度 T (K) の関数として表される。ここでは、クリープ力学の基礎式として広く用いられている Norton-Bailey モデル¹⁷⁾¹⁸⁾ を用い、PC スtrand のクリープ挙動の定式化を行う。このモデルでは応力、時間、温度が独立と仮定している。

$$\varepsilon_{cr} = B \cdot \exp(-Q/T) \sigma^m t^n \quad (17)$$

クリープ速度 $\dot{\varepsilon}_{cr}$ は、

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = \frac{d\varepsilon_{cr}}{dt} = n \sigma^m t^{n-1} B \cdot \exp(-Q/T) \quad (18)$$

ここで、 B 、 Q 、 m 、 n は材料定数である。

式(18)において負荷応力と時間を固定すると、

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{cr} \big|_{\sigma, t} &= n \sigma^m t^{n-1} B \cdot \exp(-Q/T) \\ &= \text{const1} \cdot \exp(-Q/T) \end{aligned} \quad (19)$$

となる。この式は、アレニウス(Arrhenius) 法則と言われ、クリープと温度の関係において広く用いられている。ここで、 Q は図 11 に示す直線の勾配で与えられ、材料、クリープ段階、負荷荷重の大きさと温度の範囲により変化するものである。しかし、負荷応力が 0.7 f_y 以下で一定、4 時間以内、温度 250℃ 以下という条件の下に、近似的に一定値としてもよいと考えられる¹⁹⁾。応力一定のクリープ試験結果(試験条件 1~6) から、各時間 $t=60, 120, 180$ 分における瞬間クリープひずみ速度を各試験温度ごとに求め、これを試験温度 T (K) に図示したものを図 11 に示す。図は縦軸はクリープひずみ速度の対数値を、横軸は温度 T (K) および温度の逆数 $1/T$ (K⁻¹) を表している。図に示すようにほぼ直線関係があり、同一負荷応力に対して温度が高くなるほど、クリープひずみ速度は大きくなる。60~180 分の負荷時間においては、これらの直線はほぼ平行である。本実験に用いた材料について時間 t の単位を分、温度 T を絶対温度(K) とするとき、負荷応力 0.7 f_y について $Q=4.57 \times 10^3$ の値を得た。

また、温度一定のもとで、クリープひずみ ε_{cr} と負荷応力 σ および負荷時間 t との間には鋼に関して次式で表される関係があることが知られている¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾。

$$\varepsilon_{cr} \big|_T = \text{const2} \cdot \sigma^m t^n \quad (20)$$

ここで m, n は実験から定まる定数である。図 12 は 250°C におけるクリープひずみ ϵ_{cr} と負荷時間 t を両対数目盛上に負荷応力 σ をパラメーターとして示したものである。これらの関係は線形で表すことができ、同一の温度下において 3 直線がほぼ平行である。したがって、直線の勾配により定数 n が定められ、負荷応力に関らず、ほぼ一定値($n=0.37$)となる。負荷時間 180 分におけるクリープひずみの対数値と負荷応力の関係を図 13 に示す。図に示すように、クリープひずみの対数値と負荷応力の対数値の関係はほぼ直線で表すことができ、定数 m はこの直線の勾配から求められる²¹⁾。残るのは定数 B であるが、上記で定めた定数 Q, m, n の値を固定し、式(17)との適合性が最もよくなるように B を最小二乗法で決定した。最終的に決定した材料定数を表 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 8 の破線に示す。常温から 250°C までの温度範囲におけるクリープ挙動は Norton-Bailey モデルで近似できる。

表9 PC ストランドの材料定数

鋼材種類	B	Q	m	n
SWPR7BL	3.00×10^{-5}	4.57×10^3	3.37	0.34

4.4 非定常におけるクリープひずみの予測

火災時の PC 鋼材の温度は時間的に変化するので、非定常状態でのクリープ挙動を把握する必要がある。温度変動下でクリープひずみの予測に用いられる理論として時間硬化則とひずみ硬化則が挙げられる²²⁾。一般的に、ひずみ硬化則の方が実験値とよく一致するとされているが、計算は煩雑で温度解析に多くの時間が必要である。そのため、ここでは計算の簡略化のために時間硬化則を用いることとする。時間硬化則は、式(21)のようにクリープひずみ速度はその時点の応力と温度およびクリープ開始からの時間に依存すると仮定するものである。

$$\dot{\epsilon}_{\sigma} = f(\sigma, T, t) \quad (21)$$

たとえば、ある温度におけるクリープ曲線が与えられる場合を考える。図 14 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。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、D 点のクリープひずみは変わらないまま B 点に移動し、 T_2 のクリープ曲線に従うことになる。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。一方、ひずみ硬化則は、D 点のひずみが変わらないまま、A 点に移動し、 T_2 のクリープ曲線に従うことになる。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。時間硬化則とひずみ硬化則は、一定温度下での応力変動においても同様に用いることができる。

ここで、一定温度 T_1 および T_2 におけるクリープ曲線は 4.3 で示した Norton-Bailey モデルから予測する。Norton-Bailey モデルと時間硬化則による予測値と、非定常クリープ試験結果 (条件 9, 14, 15) を比較し、図 15 に示す。図中の温度は、試験体における 3 点の温度測定値を平均したものである。

図より負荷応力 $0.7, 0.5f_y$ においては予測値と実験値が概ね一致し

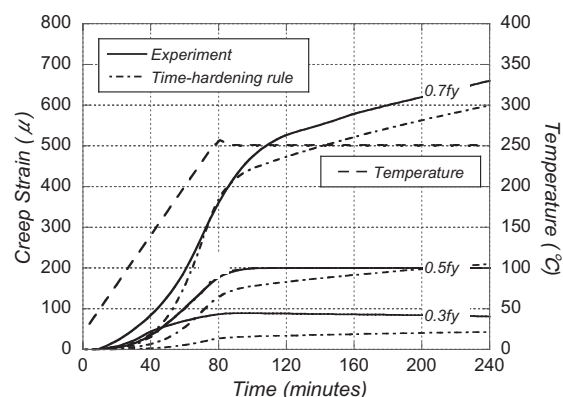


図 15 実験値と時間硬化則の比較

ているが、 $0.3f_y$ においては予測値と実験値の差が大きい。 $0.3f_y$ および $0.5f_y$ では、77 分 (温度が 250°C に達する時間) において実験値が予測値よりそれぞれ 60μ および 50μ 大きく、 $0.7f_y$ においてはほぼ一致している。すなわち、予測値に対する実験値の比は、 $0.3f_y$ で約 2.14 倍、 $0.5f_y$ で約 1.35 倍、 $0.7f_y$ で約 1.00 倍となっている。目標温度 250°C、負荷応力が $0.5 \sim 0.7f_y$ で一定、4 時間以下の条件下における非定常クリープ予測においては時間硬化則が適用可能と考えられる。

本稿ではクリープひずみが比較的小さな範囲であったために時間硬化則でも、ある程度予測できたと考えられる。クリープひずみが過渡的に増加するような条件下においては、時間硬化則よりもひずみ硬化則、あるいは古村らによる修正ひずみ硬化則²³⁾²⁴⁾の方が精度よく評価できることが知られている。これについては、今後行う追加実験により検討していく予定である。

5. 高温時 PC 鋼材のリラクセーション

プレテンション方式による PC 部材の製造にあたって、緊張用ベッドの使用効率を高めるために蒸気養生または高温養生 (オートクレーブ処理) が行われている。このような養生は、通常 100~200°C の温度で 10 時間前後行われており、PC 鋼材の高温リラクセーションを精度よく予測できる手法が必要不可欠である。

リラクセーション試験は、初期ひずみを試験体に与え、そのひずみを一定に保つことで行うが、高温下においては試験体に応力を負荷すると、変形が急激に進むためにひずみを一定に保つことが非常に難しい。そのため、既往の文献においてもリラクセーション試験例はごくわずかである⁷⁾²⁵⁾。一方、クリープ試験は応力を一定に保つことで行うため、高温下においても比較的容易である。したがって、高温におけるリラクセーションの特性をクリープ試験結果から予測できれば便利である。ここでは、クリープ試験結果に基づいて高温時 PC ストランドのリラクセーション値を予測する方法について述べ、既往文献のデータと比較することで本予測法の妥当性を検討する。

5.1 予測方法²⁶⁾

クリープとリラクセーションは、ともに時間とともに塑性ひずみ ϵ_{inel} が増加することによって生じる現象である。通常、金属の全ひずみ ϵ_{total} は、弾性ひずみ ϵ_{el} と塑性ひずみ ϵ_{inel} から成る。

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{inel} \quad (22)$$

この弾性ひずみと塑性ひずみは、それぞれ線形および非線形関数で、鋼材に生じている応力が弾性範囲である場合、塑性ひずみをクリープひずみ ε_c として式(23)のように表すことができる。

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{inel} = \sigma / E(T) + \varepsilon_c(\sigma, T, t) \quad (23)$$

ここで ε_{el} は負荷応力 σ に比例し、 $\varepsilon_{el} = \sigma / E(T)$ と表される。 $E(T)$ はヤング係数であり、温度 T に依存する。一方、リラクセーション試験では、初期ひずみを試験体に与え、そのひずみを一定に保つ。式(23)を応力 σ について解き、式(24)のように表すことができる。

$$\sigma = E(T) \cdot \varepsilon_{total} - E(T) \cdot \varepsilon_c(\sigma, T, t) \quad (24)$$

試験中全ひずみが一定に保持されるため、式(24)よりクリープひずみ $\varepsilon_c(\sigma, T, t)$ が増加するとともに、応力 σ は減少する。応力低下量を初期応力で除することによってリラクセーション値が得られる。ヤング係数の温度依存性は、式(9)~(10)を用いて求める。

式(24)で見られるようにクリープからリラクセーションを予測するためには、まず一定応力および一定温度下における時間 $t=t_i$ でのクリープひずみを測定し、4.3 節のような定式化を行う必要がある。次に、時間 $t=t_i$ で生じた応力低下を次ステップ時間 $t=t_{i+1}$ に考慮する必要がある。ここでは、4.4 で述べた時間硬化則を用いる。表 10 に手順の詳細を示す。

表10 リラクセーションの予測手順

初期応力: σ_0 , 温度: T , ヤング係数: $E(T)$ 初期ひずみ: $\sigma_0 / E(T)$, リラクセーション試験開始時: $t=t_0$	
①	対象となる鋼材種に対してクリープ試験データを得る。
②	クリープ試験データを基に各温度におけるクリープひずみ-時間関係のモデル化を行う。モデルには式(17)に示す Norton-Bailey model を用いる。
③	Norton-Bailey model と時間硬化則を用いて、 $t=t_i$ での火災時クリープひずみ $\varepsilon_{ci}(\sigma, T, t_i)$ を予測する。ここでは、 t_i を 0, 5, 10, …600 分と設定した。
⑤	式(24)を用いて $t=t_i$ での応力 σ_i を予測する。鋼材のヤング係数 $E(T)$ の温度依存性は式(9)~(10)で考慮する。
⑥	$t=t_i$ でのリラクセーション値を算定する。 $Relaxtion = \frac{\sigma_0 - \sigma_i}{\sigma_0} \times 100(\%) \quad (25)$
⑦	時間 $t=t_i$ でリラクセーションにより生じた応力低下を考慮し、クリープひずみ-時間関係の再設定を行う。ここでは、時間硬化則に従う。
③~⑦を所定時間まで繰り返す。	

5.2 既往研究との比較

リラクセーション実験値と予測値を比較し図 16 に示す。図中の実験値は、直径 7mm の PC 鋼線ストレッチング材（低リラクセーション材）を対象とした文献 6) 記載のデータである。JIS G 3109 のリラクセーション試験方法に準じて鋼材の初期導入応力を規格降伏応力

の 80%、測定温度を 20, 150, 200°C として得られたものである。筆者らの試験体とは化学組成がほとんど一致しており、同種の鋼材であるため比較対象とした。

図より、150°C および 200°C では、600 分において実験値が予測値より 0.3 ポイント程度大きく、20°C においてはほぼ一致している。すなわち、予測値に対する実験値の比は、20°C で約 1.00 倍、150°C で約 1.14 倍、200°C で約 1.03 倍となっている。実験値と予測値がよく一致している。

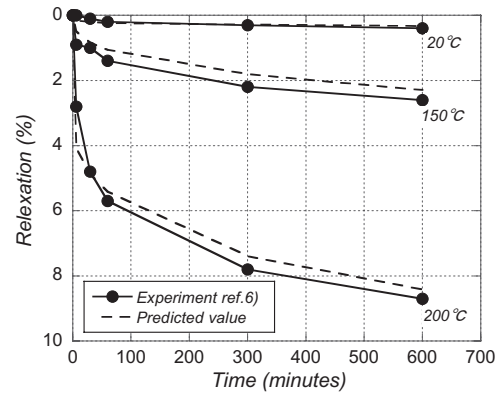


図 16 リラクセーション実験値と予測値の比較

6. 結論

火災時および火災後における PC 部材の強度と変形を評価するために、PC スtrand の高温時特性について下記のような項目を検討した。

- (1) PC スtrand の降伏強度は、300°C から 600°C の間で大きく低下する。また、300~400°C 付近のみであるが、スtrand の降伏強度低下は、PC 鋼棒よりも大きい。
- (2) PC スtrand の高温下での応力-ひずみ関係、降伏強度、ヤング係数の低下について、高温引張試験に基づいてモデル化を行った。
- (3) 定常状態での PC スtrand は、200°C を超えると急激にクリープひずみが増加する。
- (4) 定常状態での PC スtrand のクリープひずみは、200°C までは PC 鋼棒のクリープひずみより小さいが、250°C からは大きくなる。
- (5) 定常状態での PC スtrand のクリープひずみと時間、温度、応力の関係をそれぞれ示し、これらの関係から Norton-Bailey モデルの材料定数を定めた。常温から 250°C までの温度範囲における PC スtrand のクリープひずみは Norton-Bailey モデルで近似することができた。
- (6) 負荷応力が $0.5 \sim 0.7f_y$ で一定、目標温度 250°C、4 時間以下の条件下における非定常クリープ予測においては時間硬化則が適用可能である。
- (7) クリープに基づく高温時 PC 鋼材のリラクセーション予測方法を述べ、既往文献データと比較することで妥当性を評価した。その結果、簡便ながらも高い精度を示した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神鋼鋼線工業（株）に PC 鋼材と実験施設を提供して頂いた。ここで、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) Andrew H.Buchanan : Structural Design for Fire Safety, John Wiley & Sons, LTD, 2001
- 3) 西山峰広, 原田和典, 谷昌典: プレストレストコンクリート梁部材の高温時曲げ耐力評価, 日本建築学会構造系論文集, No.606, pp.171-178, 2006.8
- 4) 日本建築学会: 鋼造材料の耐火性ガイドブック, 2004
- 5) 林成俊, 西山峰広: PC 鋼材の高温クリープひずみが PC 梁部材のたわみに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.499-504, 2010
- 6) 丸山公一, 中島英治: 高温強度の材料科学, pp.1-3, 2002
- 7) PC 鋼材委員会 レラクセーション分科会: PC 鋼材のリラクセーションがプレストレス損失量に及ぼす影響に関する検討, プレストレストコンクリート Vol.20, No.6, pp.7-51, 1978
- 8) EC3(1995). Eurocode 3 : Design of Steel structures. ENV 1993-1-2 : General Rules - Structural Fire Design. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- 9) 日本建築学会: 鋼構造耐火設計指針, 1999
- 10) EC2(1993). Eurocode 2 : Design of Concrete Structures. ENV 1992-1-2 : General Rules - Structural Fire design. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- 11) 伊藤清陽, 深野徹, 西山峰広, 原田和典: 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, A-2, 防火 海洋建築 情報システム技術, pp.49-50, 2005
- 12) 日本鋼構造協会: 鉄筋コンクリート用棒鋼および PC 鋼棒・鋼線の高温ならびに加熱後の機械的性質, JSCC vol.5, 1969
- 13) Morrow J : Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals, ASTM STP, No.378, pp.45-87, 1965
- 14) 林真理子, 谷昌典, 西山峰広, 原田和典: PC ストランド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, C-2, 構造IV, pp.837-838, 2007
- 15) 林成俊, 西山峰広: 高温における PC 鋼棒のクリープモデルに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.529-534, 2009
- 16) 岡本一生, 吉村陸文, 坂尾那須男, 沢谷 精: PC 鋼線のリラクセーションに及ぼす Si の影響, 日本鉄鋼協会, 鉄と鋼, Vol. 55(3), pp.296, 1969
- 17) F. H. Norton: The Creep of Steel at High Temperatures, McGraw-Hill, New York, 1929
- 18) R. W. Bailey : Creep of Steel Under Simple and Compound Stress, Engineering, Vol.121, pp.265, 1930
- 19) 西原利夫, 平修二, 田中吉之助, 大南正瑛: 軟鋼の第一期クリープに及ぼす温度効果, 日本機械学会材料試験 5(36), pp.536-540, 1956
- 20) 平修二, 大南正瑛, 坂戸瑞根: クリープにおける温度履歴の影響, 日本機械学会論文集 No.176, pp.373-380, 1961
- 21) 定常クリープにおける応力指数の特性について, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集(1), pp.433-434, 2004
- 22) 矢川元基, 宮崎則幸: 有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析, サイエンス社, pp.60-65, 1991
- 23) 藤本盛久, 古村福次郎, 安部武雄: Further studies of the Primary Creep of Structural Steel under Step-wise Change of Stress, 日本建築学会論文報告集, No.322, pp.146-154, 1982.12
- 24) 古村福次郎, 安部武雄: Effect of Step-wise Change of Temperature on Primary Creep of Structural Steel, 日本建築学会論文報告集, No.339, pp.165-173, 1984.5
- 25) J. Gales, L.A. Bisby, C.MacDougall, K. MacLean : Transient high-temperature stress relaxation of prestressing tendons in unbonded construction, Fire Safety Journal, No.44, pp.570-579, 2009
- 26) 林成俊, 西山峰広: PC 鋼棒の高温時クリープひずみ-時間関係モデルからのリラクセーション予測, PCEA プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, No.18, pp.7-12, 2009

(2010年8月10日原稿受理, 2010年12月6日採用決定)