

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

京都大学工学研究科 正会員 工修 ○林 成俊
京都大学工学研究科 正会員 博士(工学) 西山 峰広

Abstract

Relaxation and creep of steel materials are caused by an inelastic strain due to stress, temperature and time even they are in elastic range. Relaxation appears as stress reduction, and creep as strain increment. To obtain the inelastic strain appearing in either one of these phases, creep tests are easier than relaxation tests at elevated temperatures because it is more difficult to hold a constant strain than a constant stress.

The authors propose an estimation method for relaxation of prestressing steel at elevated temperatures. The method is based on a creep strain - time relationship model and the strain-hardening rule. A creep strain - time relationship is idealized by creep tests at elevated temperatures conducted by the authors and a numerical expression proposed by Fujimoto. Reduction in Young's modulus at elevated temperatures is also considered. The estimation results agree well with relaxation test results reported in past literatures.

Keyword : Relaxation, Creep, Prestressing steel, Elevated temperature, Strain-hardening rule

1. はじめに

近年、建築工事においてはプレキャスト化が進んでおり、多種多様な部材がプレキャスト工場で製造されている。プレキャスト部材の使用は、工期短縮や個々の部材品質の安定につながる。プレキャスト部材製造においては翌日に脱型を行うことを前提とした製造サイクルや初期強度を確保するために蒸気養生や高温養生が行われる。このような養生は、通常 100°C~200°Cの温度で、10 時間前後行われる。プレストレストコンクリート(以下 PC と略記)産業においても、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 PC パイルの製造に一部で採用されている高温養生(オートクレーブ処理)が行われている。

PC 鋼材のリラクセーションについては、原子力発電所施設においてその構造物の重要性から今まで数多くの研究が行われ、低温および高温下における性状が明らかにされてきた¹⁾²⁾³⁾。それらの研究の中心は、-40°Cから 200°Cまでの温度領域であり、蒸気養生や高温養生下で PC 部材を製造するにあたって、PC 鋼棒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後、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くリラクセーションを正確に測定できないという問題がある。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特性より予測できれば好都合である。

そこで、本研究では、筆者らが行った高温クリープ試験結果に基づいてその挙動をモデル化し、得られたクリープひずみ-時間関係モデルとひずみ硬化理論を用いることで、高温リラクセーションの評価法を提案する。また、予測値と既往の実験結果⁴⁾を比較することにより、本評価方法の妥当性を検討する。

2. クリープとリラクセーションの関係

図-1 にクリープとリラクセーションの関係を示す。クリープとは、一定応力を受ける材料が、ある時間中に生じる変形であり、リラクセーションとは、変形が一定の時に時間とともに応力が減少していく現象である。この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。

図-1 (a) に示すように金属の全ひずみ ϵ_{total} は、弾性ひずみ ϵ_{el} と塑性ひずみ ϵ_{inel} から成る。

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{el} + \epsilon_{inel} \quad (1)$$

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、鋼材の変形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(2)のように表すことができる。

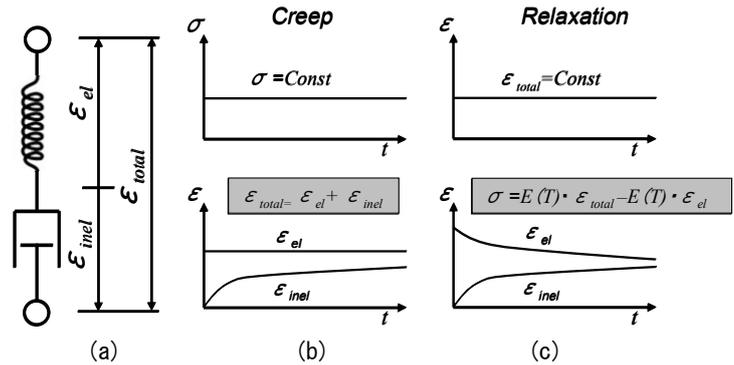


図-1 クリープとリラクセーション

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{el} + \epsilon_{inel} = \sigma / E(T) + \epsilon_c(\sigma, T, t) \quad (2)$$

ここで ϵ_{el} は応力 σ に比例し、 $\epsilon_{el} = \sigma / E(T)$ と表される。 $E(T)$ はヤング係数であり、温度 T に依存する。また、クリープひずみ ϵ_c は、応力 σ 、時間 t および温度 T の関数である。

一方、リラクセーション試験では、図-1 (c) のように初期ひずみを試験体に与え、そのひずみを一定に保つ。式(2)を応力 σ について解き、式(3)のように表すことができる。

$$\sigma = E(T) \cdot \epsilon_{total} - E(T) \cdot \epsilon_c(\sigma, T, t) \quad (3)$$

試験中全ひずみが一定に保持されるため、式(3)よりクリープひずみ $\epsilon_c(\sigma, T, t)$ 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。

3. 高温リラクセーションの予測手順

クリープひずみ評価モデルからリラクセーションを予測する方法を以下に示す。

表-1 高温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(5)に示す Fujimoto モデルを用いる。
③	式(5)を用いて、 $t=t_i$ でのクリープひずみ $\epsilon_{cl}(\sigma, T, t_i)$ を予測する。ここでは、 t_i を 30 分、120 分、300 分、600 分と設定した。
④	式(3)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(6)で考慮する。
⑤	$t=t_i$ でのリラクセーション値を算定する。 $Relaxtion = \frac{\sigma_0 - \sigma_i}{\sigma_0} \times 100(\%) \quad (4)$
⑥	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、ひずみ硬化理論 (7 で記述する) に従う。
⑦	③~⑥を所定時間まで繰り返す。

4. 高温クリープ試験

3 で示した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が必要である。ここでは、筆者らが行ったクリープ試験について述べる。

4.1 試験体概要

直径 13mm の PC 鋼棒(SBPR1080/1230) 7 本を試験体として用いた。表-2 に示すように 7 本の試験体とも種類・寸法は同一である。鋼材の化学組成および機械的性質を表-3 および表-4 に示す。

表-2 試験体の鋼種と寸法

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 試験体の化学組成 (%)

試験体	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SB1	0.35	1.61	0.68	0.011	0.003	0.01	0.01	0.01

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)	ヤング係数 E_p (MPa)
SB1	規格値	1080 以上	1230 以上	201000 以上
	試験値	1229*	1296	201000

*0.2% オフセット

4.2 試験条件

表-5 にクリープ試験条件を示す。各設定温度における試験区間のクリープひずみを計測し、一定温度下でのクリープひずみと時間の関係を調べた。なお、試験では所定温度まで上昇後に載荷を行い、応力を一定に保った。表中の f_y は規格降伏応力を表す。

表-5 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						

4.3 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 にそれぞれ示す。図-2 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、同材質のダミー鋼棒を用いて熱膨張を相殺した。ひずみは、ダミー鋼棒の下端に設置した 2 つの変位計による測定値の差を検長 250mm で除して算出した。クリープひずみは、測定されたひずみから載荷完了時の弾性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による温度計測を実施した。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」に記載の常温でのリラクセーション試験法に従い、

200MPa/min の応力速度で所定応力まで载荷した。なお、PC 鋼棒の引張試験結果⁵⁾では PC 鋼棒が 300℃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ため最高設定温度を 300℃とした。加熱速度は 3℃/min とした。



写真-1 クリープ試験機



写真-2 加熱炉

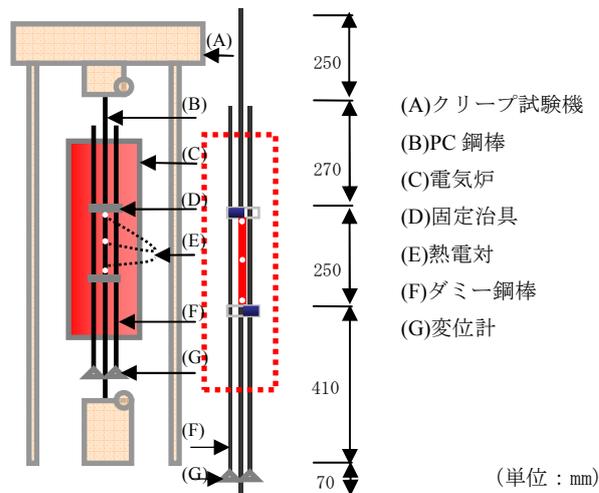


図-2 試験体設置状況

4.4 試験結果

実験より得られたクリープひずみ-時間関係を図-3 に示す。PC 鋼棒のクリープひずみは、100℃までは顕著ではないが、100℃を超えると増加する。

5. 高温クリープのモデル化

高温クリープ実験結果に対して、過去に提案された一定温度下での3つの高温クリープモデル(Norton-Bailey, Harmathy, Fujimoto モデル)を適用し、PC 鋼材の高温時クリープ挙動の定式化を行った⁶⁾。本稿では、最も適合性が高いと判断された式(5)で表される Fujimoto モデルを用いることにする。モデルの詳細は文献 6)に記載している。

$$\epsilon_c = \frac{10^{\frac{a}{T}+b} \sigma^{\frac{c}{T}+d} t^{eT+f}}{100} \quad (5)$$

ここで、 σ は応力(MPa)、 t は载荷時間(分)、 T は絶対温度(K)である。なお、 a, b, c, d, e, f は鋼種によって決まる材料定数である。実験結果に対して、最小二乗法を用いて回帰分析を行った。

得られた材料定数を表-6 に示す。

表-6 Fujimoto モデルにおける材料定数

鋼種	a	b	c	d	E	f
C 種 1 号 SBPR1080/1230	1503.98	-10.59	-7.93×10^2	3.53	4.80×10^{-4}	2.69×10^{-3}

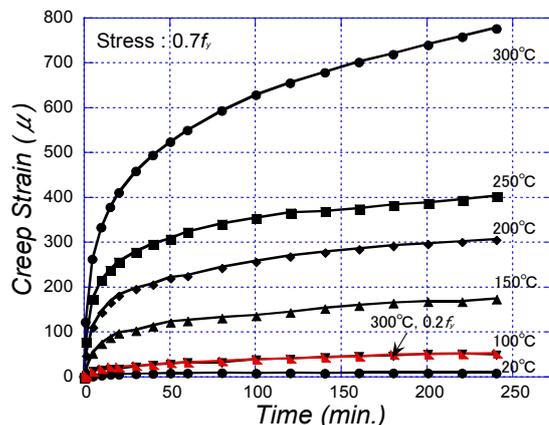


図-3 高温クリープ試験結果

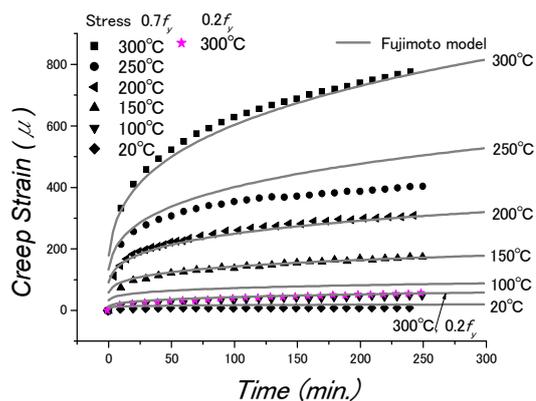


図-4 モデルによる予測値と実験値の比較

Fujimoto モデルによる予測値と実験結果を比較し図-4に示す。図に示すように、常温から300℃までの温度範囲におけるクリープひずみに対する時間と温度の関係は Fujimoto モデルによって近似することができる。

6. ヤング係数の温度依存性

図-5に筆者らが行ったPC鋼棒に対する高温引張試験結果から得られた高温時ヤング係数の常温時ヤング係数に対する比⁵⁾を示す。また、AS400およびNZS3404に提案されているモデルも示している⁷⁾。図より、ヤング係数と鋼材温度の関係は、常温から400℃まではAS400およびNZS3404のモデルとよく一致している。そこで、本研究では、AS400およびNZS3404モデルを用い、ヤング係数の温度依存性を求める。以下にその関係式を示す。

$$k_{E,T} = 1.0 + T / [2000 \cdot \ln(T/1100)] \quad 0^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C} \quad (6)$$

7. ひずみ硬化理論

一定温度、応力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。一般的にはひずみ硬化理論の方が実験とよく一致するといわれており、本研究ではひずみ硬化理論を用いることにした。ひずみ硬化理論について図-6に示す。ODFは一定温度下、応力 σ_i での、OABCは応力 σ_{i+1} 下でのクリープひずみと時間の関係を示す。時間 t_i において瞬間的に応力が σ_i から σ_{i+1} ($\sigma_i > \sigma_{i+1}$)に低下したとすると、D点のクリープひずみは変わらないまま、B点に移動し、以後は σ_{i+1} のクリープ曲線に従う。すなわち、経路ODBCに基づき、応力変動後のクリープひずみ曲線は、経路DEに従う。

8. リラクセーション実験値と予測値の比較

リラクセーション実験値と予測値を比較し図-7に示す。図中の実験値は、異形PC鋼棒を対象とした文献4)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℃、120℃、200℃、240℃として得られたものである。筆者らがクリープモデル化に用いた試験体とは化学組成がほとんど一致しており、同種の鋼棒であるため本予測手法を適用した。ただし、クリープモデル化に用いた試験体はケイ素(Si)が約1.3%より多く含まれている。

予測値の計算は、実験値と同様の条件下で30分、120分、300分、600分において行った。時間刻みを細かくすれば精度は向上すると予想されるため、10分刻みでの計算も行ったが、ほとんど差はなかった。また、実験範囲ではないが、PC部材が火災を受ける場合を想定した300℃および350℃におけるリラクセーションの予測値も併せて示している。

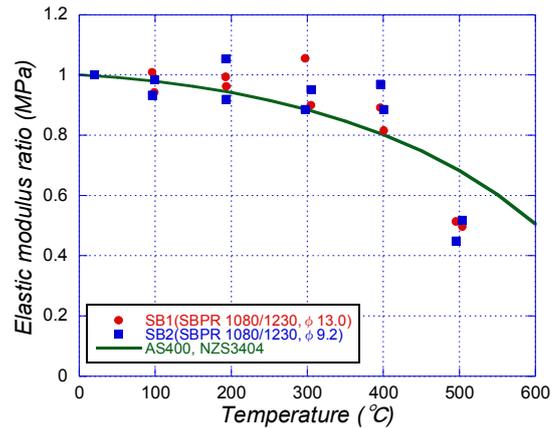


図-5 ヤング係数-鋼材温度の関係

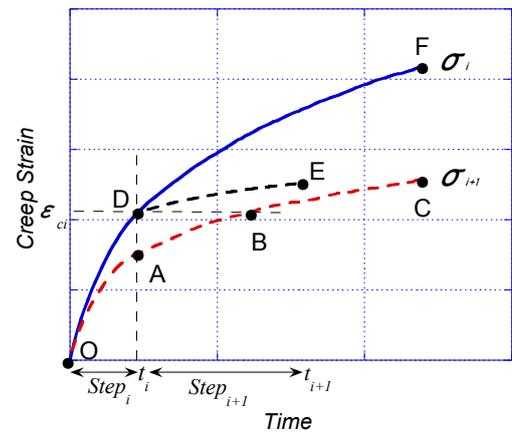


図-6 ひずみ硬化理論

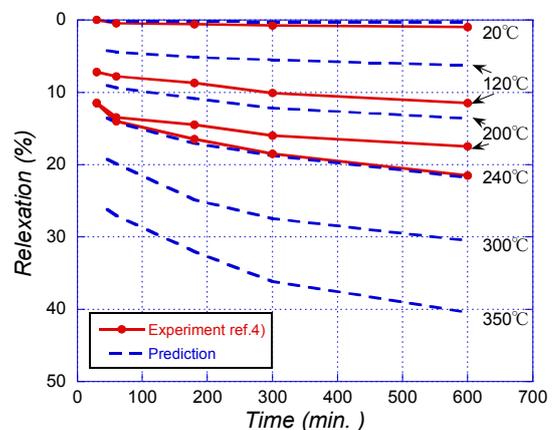


図-7 実験値と予測値の比較

図より、120℃および200℃では実験値が予測値より600分においてそれぞれ4ポイントおよび3ポイント程度大きく、240℃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℃で約3.0倍、120℃で約2.0倍、200℃で約1.25倍、240℃で約1.0倍となっている。

これは主にPC鋼棒のケイ素含有率の違いから生じる差と推察される。ケイ素は、常温でその組織が複雑に絡みあっているために、その量を増すとリラクセーションが小さくなるといわれている⁸⁾。また、リラクセーションはPC鋼棒の内部に含まれている転位に依存する。この転位は温度が上昇すると熱エネルギーを得てより可動化しやすくなり、リラクセーション値を増加させる原因となる。

すなわち、クリープモデル化に用いた試験体には複雑に絡み合っているケイ素が多く含まれているために、常温近くでのリラクセーションが抑制される。その後、高温になるにつれ絡み合っていた転位が熱エネルギーの助けにより急激に可動化することからリラクセーション値が大きくなり、予測値と実験値の差が小さくなったと考えられる。また、350℃および300℃においては、600分後のPC鋼棒リラクセーション値はそれぞれ40%および30%に達することが予想される。

9. まとめ

本研究から得られた結論は以下のとおりである。

- (1) PC鋼棒のクリープ試験結果からFujimotoモデルの材料定数を決定することでクリープひずみ-時間関係のモデル化を行った。
- (2) クリープとリラクセーションの関係式とひずみ硬化理論を用いて、クリープひずみ-時間関係モデルからリラクセーション値を予測する方法を提案した。
- (3) 上記方法を用いたリラクセーションの予測値と既往の実験データを比較した結果、本予測法は簡便ながらも比較的高い精度を示す。
- (4) 上記予測方法により、300℃、350℃における600分でのリラクセーション値はそれぞれ30%、40%となった。

〔謝辞〕

クリープ試験においてPC鋼材と実験施設を提供して頂いた高周波熱錬(株)に感謝の意を表す。

〔参考文献〕

- [1] 六車 熙：プレストレストコンクリートの現状と将来、建築技術者のためのプレキャストPC、フドウ建研、pp.9-37, 1975.11
- [2] 土井 明, 富岡敬之, 山田義之助：PC鋼線の加工性とリラクセーションの改善, RID, pp.75-80, 22-1, 1972.1
- [3] 土井 明, 富岡敬之, 田中義人：スタビライズドPC鋼線の諸特性について、プレストレストコンクリート, pp.34-42, 16-4, 1970.7
- [4] 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, 1978.12
- [5] 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, pp.49-50, 2005
- [6] 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
- [7] Andrew H.Buchanan：Structural Design for Fire Safety, John Wiley&Sons LTD, pp.198-200, 2001
- [8] 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