

# 論文 PC 鋼材の高温時クリープひずみが部材たわみに及ぼす影響に関する研究

林 成俊\*1・西山 峰広\*2

**要旨**：本研究は、筆者らが行った高温クリープ試験結果から得られた PC 鋼材のクリープひずみが PC 梁部材のたわみに及ぼす影響について次のような方法を用いて検討した。ISO834 標準加熱に対して部材中の PC 鋼材が受ける温度を熱伝導略算式を用いて求めた。次に、各ステップ（加熱時間に対応）におけるクリープひずみをクリープ試験結果から求め、PC 鋼材ひずみ増分とし、軸力の釣り合いとモーメントの釣り合い、平面保持仮定から、クリープひずみが生じた後の曲率を算定した。最後に、曲率を部材全長にわたって積分することにより高温時における PC 梁のたわみ増分を求めた。この方法に基づき、文献 6)の実験結果と比較検討を行った結果、PC 鋼材のクリープひずみが部材たわみに及ぼす影響は全たわみ量の約 1/2 となった。

**キーワード**：高温クリープ, PC 鋼棒, たわみ, ひずみ分布, 曲率, プレストレス, 耐火

## 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 9<sup>1)</sup>において記されているが、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。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、その加熱条件下での部材の耐火性能を解析する性能設計を行うことも不可能である。

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鉛直荷重による引張応力を低減あるいは相殺する。そのため、火災時に PC 鋼材の強度が高温により大きく低下した場合には、常時荷重により PC 鋼材が破断し、部材の崩壊につながる可能性がある。なお、PC 鋼材のような高強度鋼材は熱に対する強度の低下が、普通強度鉄筋に比べて大きい。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、1.7(G+P) に対する終局強度設計を行っている限り、火災により梁中央部での曲げ耐力が失われても、両端部の曲げ耐力により常時荷重を支持できることを示した<sup>7)</sup>。

しかしながら、火災時骨組中の梁部材が崩壊まで達しなくても高温によって PC 鋼材に高温クリープ（もしくはリラクゼーション）もしくは大きな塑性ひずみが生じると、たわみが大きくなる。PC 部材は通常、PC 鋼材の再緊張によってその性能を回復したり、部分的に修復したりすることができないことから、火災後の再使用を視野に入れた部材たわみに基づく耐火設計を行っておく必要もある。

常時荷重を受ける PC 梁が火災により加熱されること

を想定すると PC 鋼材はほぼ一定の引張力が働いている状態で加熱されることとなる。したがって PC 鋼材における高温時の応力-ひずみ関係は通常の応力によるひずみだけではなく、式(1)に示すような高温クリープひずみを考慮しなければならない。

$$\epsilon_t = \epsilon_\sigma(\sigma, T) + \epsilon_{th}(T) + \epsilon_{cr}(\sigma, T, t) \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_\sigma(\sigma, T)$ は応力によるひずみ、 $\epsilon_{th}(T)$ は熱膨張によるひずみ、 $\epsilon_{cr}(\sigma, T, t)$ はクリープによるひずみである。

この問題に対して筆者らは、PC 鋼棒および PC ストランドを対象に高温引張試験<sup>2),3)</sup>を行い、高温時の降伏強度および引張強度、ヤング係数、応力-ひずみ関係のデータを蓄積してきた。文献 4)では PC 鋼棒を対象に高温クリープ試験を行い、一定温度下におけるクリープ挙動の定式化を行った。

本研究では、このクリープ試験結果に基づいて高温時に PC 鋼材のクリープひずみが PC 梁のたわみに及ぼす影響について解析的に検討し、ポストテンション方式による PC 部材の耐火試験結果<sup>6)</sup>と比較する。

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

## 2. 高温時における部材たわみの算定方法

火災時 PC 部材のたわみ増加の要因としては、温度変化に伴う㊶コンクリートの弾性係数の低下、㊷断面 2 次モーメントの低下、㊸PC 鋼材のクリープ（またはリラクゼーション）、㊹部材の内部温度分布による熱応力など

\*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)

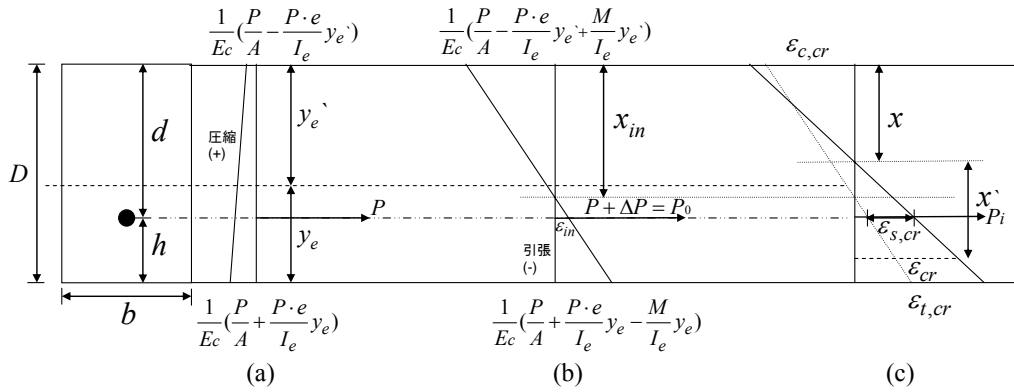


図-1 高温時におけるPC部材のひずみ分布

が挙げられる。

火災時の部材たわみを考えるとき、熱による部材断面欠損や熱応力による変形増加は大きい。また、これらの要因は、特立ではなくそれぞれが複雑に絡み合っている。しかし、本研究ではPC鋼材のクリープひずみのみによる変形に焦点をあてる。なお、PC鋼材にクリープひずみが生じると、コンクリートのひずみもともに大きくなるとする平面保持を仮定する。実際にはPC鋼材周辺のグラウトあるいはコンクリートがPC鋼材の伸び変形を拘束することになるが、ここでは無視した。

たわみ算定手順としては、ISO834標準加熱曲線下において部材中のPC鋼材が受ける温度を熱伝導略算式から推測する。その温度におけるクリープひずみをクリープ試験結果から求め、PC鋼材のひずみがこのクリープひずみだけ増加したとする。外力（常時荷重）は変化しないと仮定して部材断面における曲率分布を軸力の釣り合いとモーメントの釣り合い、平面保持仮定から算定する。この手順を各ステップ（加熱時間に対応）において行い、断面での部材曲率を求める。最後に、曲率を部材全長にわたり積分し、たわみを求める。

### 3. 高温時におけるPC梁断面のひずみ分布

図-1は高温時PC梁部材の各状態におけるひずみ分布を示している。図中(a)のひずみ分布は、常時荷重が加わる前にプレストレス力Pによって生ずるコンクリートのひずみである。

(b)のひずみ分布は常時荷重が加わった状態である。ここで、常時荷重に対してPC部材にはひび割れが発生させないものとする。また、コンクリートとPC鋼材は完全付着および弾性体とみなし、断面内のひずみは平面保持仮定に従う直線分布とする。また、プレストレス力導入時から火災時まで、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるプレストレス力の低下はないとする。常時荷重がかかることによりPC鋼材張力は少しだけ増加する。

(b)の状態では火災が生じ、PC鋼材にも熱が伝わると高温クリープひずみ $\epsilon_{s,cr}$ が生じる。その様子を(c)に示している。この段階でPC鋼材の全ひずみ $\epsilon_t$ は、常時荷重時ひずみ $\epsilon_{in}$ とクリープひずみ $\epsilon_{s,cr}$ の和である。熱膨張ひずみは考慮しない

ここで、ひび割れ発生前後の各状態における断面の軸力の釣り合いとモーメントの釣り合いを以下のような式に表すことができる。

(1) ひび割れ発生前

$$P_i = \frac{1}{2} E_c \epsilon_{c,cr} x b + \frac{1}{2} E_c \epsilon_{t,cr} (D - x) b \quad (2)$$

$$M - P_i \cdot e = \frac{1}{2} E_c \epsilon_{c,cr} x b (y_e' - \frac{x}{3}) + \frac{1}{2} E_c \epsilon_{t,cr} (D - x) b (y_e - \frac{D - x}{3}) \quad (3)$$

(2) ひび割れ発生後

$$P_i = \frac{1}{2} E_c \epsilon_{c,cr} x b + \frac{1}{2} E_c \epsilon_{cr} x' b \quad (4)$$

$$M - P_i \cdot e = \frac{1}{2} E_c \epsilon_{c,cr} x b (y_e' - \frac{x}{3}) - \frac{1}{2} E_c \frac{\epsilon_{cr}^2}{\epsilon_{c,cr}} x b (y_e - \frac{x'}{3}) \quad (5)$$

なお、平面保持仮定により曲率は式(6)で表される。

$$\phi = \frac{\epsilon_{c,cr}}{x} = \frac{(\epsilon_{in} + \epsilon_{s,cr})}{(D - x - j)} \quad (6)$$

ここで、 $E_c$ (MPa)はコンクリートの弾性係数、 $x$ (mm)は中立軸位置、 $P_i$ (N)はクリープひずみが生じた後のプレストレス力、 $D$ (mm)は梁全せい、 $h$ (mm)は部材表面から鋼材中心位置までの距離、 $d$ (mm)はPC鋼材有効せい、 $b$ (mm)は梁幅、 $\epsilon_{c,cr}$ はクリープひずみによって変化した圧縮縁ひずみ、 $\epsilon_{s,cr}$ はPC鋼材のクリープひずみ、 $\epsilon_{cr}$ はコンクリートのひび割れ時ひずみである。

ひび割れ発生前とひび割れ発生後において式(2)、(3)、(4)および式(5)、(6)をそれぞれ連立すると $\epsilon_{c,cr}$ に対して以下のような式となる。

ひび割れ発生前の圧縮縁ひずみ

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{c,cr}^3 \left[ \frac{2}{3} E_c b d^3 + E_c b Y d^2 - 2 E_c b e D d \right] \\ & + \varepsilon_{c,cr}^2 \left[ -E_c b Y d^2 \varepsilon_t + 2 d d M_{l+d} + 4 E_c b e D d \varepsilon_t \right. \\ & \left. - 2 E_c b d B \varepsilon_t - 3 E_c b A \varepsilon_t - 3 E_c b e D^2 \varepsilon_t \right] \\ & + \varepsilon_{c,cr} \left[ -4 M d \varepsilon_t - 2 E_c b e D d \varepsilon_t^2 + E_c b d B \varepsilon_t^2 \right. \\ & \left. + 3 E_c b A \varepsilon_t^2 + 3 E_c b e D^2 \varepsilon_t^2 \right] \\ & + \left[ 2 M d \varepsilon_t^2 - E_c b A \varepsilon_t^3 - E_c b e D^2 \varepsilon_t^3 \right] = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

ひび割れ発生後の圧縮縁ひずみ

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{c,cr}^3 \left[ \frac{1}{6} E_c b d^2 - \frac{1}{2} E_c b (y_e' + e) d \right] \\ & + \varepsilon_{c,cr}^2 \left[ \frac{1}{2} E_c b (y_e' + e) d \varepsilon_t - M_{l+d} \right] \\ & + \varepsilon_{c,cr} \left[ \frac{1}{2} E_c b (y_e + e) d \varepsilon_{cr}^2 - 2 \varepsilon_t M_{l+d} \right] \\ & + \left[ \frac{1}{6} E_c b d^2 \varepsilon_{cr}^3 - \frac{1}{2} E_c b (y_e + e) d \varepsilon_{cr}^2 \varepsilon_t \right. \\ & \left. + \varepsilon_t^2 M_{l+d} \right] = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、

$$Y = y_e - y_e' - D$$

$$A = y_e D^2 - \frac{D^3}{3}$$

$$B = -2 D y_e + D^2$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{in} + \varepsilon_{s,cr}$$

である。

#### 4. PC 梁の内部温度分布

火災時部材内の PC 鋼材が受ける温度を推定するために、式(1)に示す提案式<sup>5)</sup>を用いて ISO834 標準加熱温度曲線下でのコンクリート内部温度の計算を行った。ここでは、4時間の火災を想定している。

$$x = \frac{\sqrt{t}}{c} \log_e \left( \frac{T(x,t) - T_0}{460 t^{1/6}} \right) \quad (9)$$

ここで、 $x(\text{mm})$ は表面からの距離、 $T_0$ は初期温度である。なお、 $c$ は熱特性係数と定義され、材料ごとに実験値をもとに定めることができる。普通コンクリートでは  $c=0.21$ 、軽量コンクリートでは  $c=0.23$  とすればよいことが示されている。しかし、ここでは筆者らが行った PC 梁部材の耐火試験結果<sup>6)</sup>における内部温度分布に式(9)を適用して得られた熱特性係数  $c=0.18$  を用いた。

図-2に部材表面から鋼材表面までの距離  $x$  (以下、かぶり厚さ)を 20~200mm に変化させて温度計算を行った結果を示す。PC 鋼棒の引張試験結果<sup>2)</sup>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。したがって PC 鋼材が 300℃より高

温となると  $0.7f_y$  の初期応力を導入している限りクリープ試験が難しい。そこで、温度を 300℃以下に限定するとかぶり厚さに関らず、図に示されるように温度と時間の関係をほぼ線形で表すことができる。

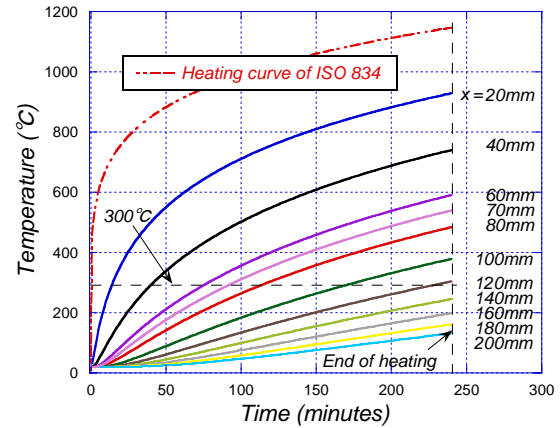


図-2 熱伝導略算式による温度推移

#### 5. PC 鋼棒の高温クリープ試験

##### 5.1 試験体

実験では直径 13mm の PC 鋼棒(SBPR1080/1230)を試験体として用いた。6で示す耐火試験の試験体に用いた PC 鋼棒とは直径が異なるが、化学的性質および機械的性質は同様である。表-2に試験体種類・寸法を、表-3に鋼材の化学的性質および機械的性質を示す。

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 <sup>2</sup> )	全長 (mm)
SB1	C 種 1 号 SBPR1080/1230	φ 13	132.7	1250

表-3 試験体の機械的性質

試験体		降伏強度 (0.2%オフセット) $f_y(\text{MPa})$	引張強度 $f_u(\text{MPa})$	ヤング係数 $E_p(\text{MPa})$
SB1	規格値	1080 以上	1230 以上	$2.00 \times 10^5$
	測定値	1229	1296	$2.01 \times 10^5$

##### 5.2 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、載荷後に温度を上昇させる動クリープ試験とを行った。表-4、表-5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-4 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
荷重応力	0.7f <sub>y</sub>						0.2f <sub>y</sub>
試験時間	所定応力に達した後4時間						
	所定温度になってから、荷重を開始						

表-5 動クリープ試験条件

条件番号	8	9	10
温度(°C)	300	200	100
荷重応力	0.7f <sub>y</sub>		
試験時間	所定応力に達した後4時間		
	所定応力に達した後に加熱		

表-6 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) 所定荷重まで荷重 (荷重速度 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) 所定荷重まで荷重 (荷重速度 26.5kN/min)	3) 所定温度まで加熱後一定 保持 (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) 除荷し、自然冷却
5) 除荷し、自然冷却	5) 試験終了
6) 試験終了	

条件 1~6 では、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 8~10 は、PC 鋼棒が PC 部材に用いられる状態を想定し、最初に降伏強度  $f_y$  の 70% に相当する引張力を加えた後に温度

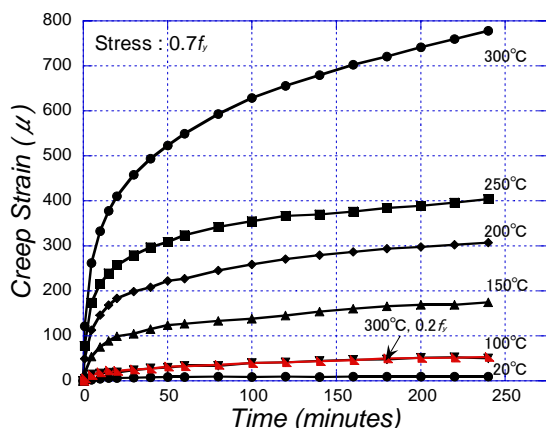


図-3 静クリープひずみに対する温度、時間、応力の影響

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。PC 梁部材のたわみ予測には、この動クリープ試験結果を用いる。

### 5.3 実験方法

PC 規準に記載の常温でのリラクゼーション試験法に従い、200MPa/min の荷重応力速度で所定応力まで上昇させた。また、4 で述べたように PC 鋼棒が 300°C より高温となると、初期応力による破断の危険がある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。

### 5.4 実験手順

静クリープ試験と動クリープ試験によって、荷重と加熱の順序が異なる。静クリープ試験は、所定温度まで加熱し、一定温度になった後所定応力まで荷重を行う。動クリープ試験では、加熱する前に所定荷重まで荷重し、その後所定温度まで加熱する。所定応力と温度に達した後はいずれの試験においても応力と温度を 4 時間保持する。表-6 に実験手順詳細を示す。

### 5.5 試験結果

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 までではほとんど増加しないが、250°C を超えると急激に増加し、300°C において最大 778μ となる。また、図-4 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。図中の原点は荷重終了後の加熱開始点である。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。図から 200°C まででは目標温度に到達以後クリープひずみはほとんど増えないが、300°C になると目標温度到達後もクリープひずみが徐々に増加し、最大で 1671μ となる。

## 6. 高温時における PC 梁のたわみ予測

ここでは、3 で示した計算法に基づいて PC 鋼材の高温クリープひずみによる PC 梁部材のたわみを算定する。

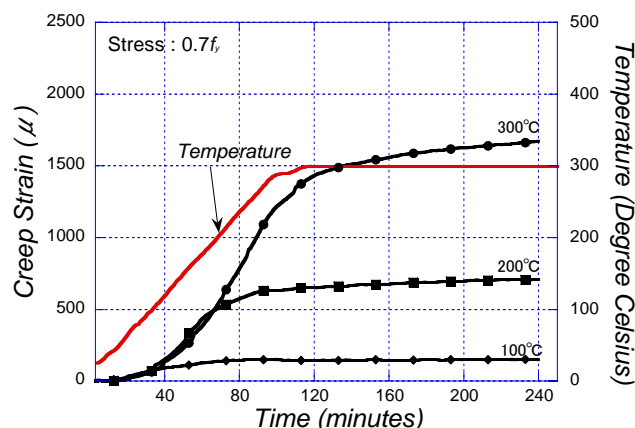
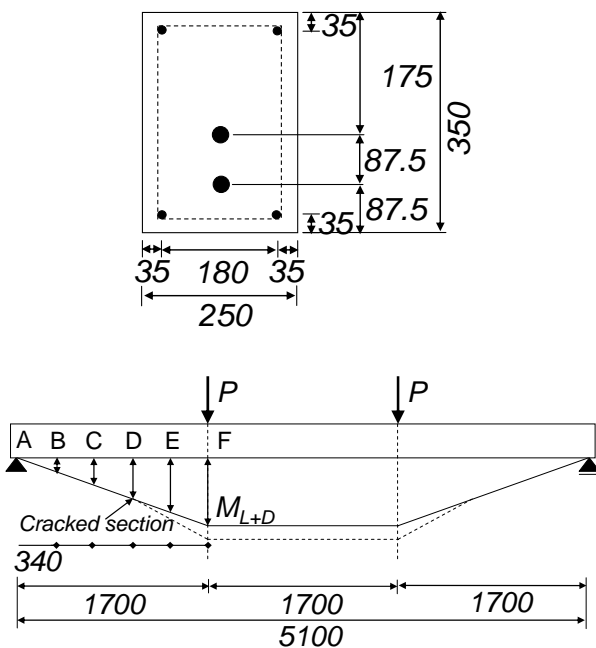


図-4 動クリープひずみに対する時間と温度の影響

### 6.1 解析対象となる PC 梁部材

解析対象となる PC 梁部材は、筆者らが行った耐火試験<sup>6)</sup>の試験体 PC-07-1 である。部材断面を図-5 に示す。図中の A~F は断面位置で、各番号との距離は  $l/15$  である。鉄筋は D10, PC 鋼棒は公称径 21mm の C 種 1 号 SBPR1080/1230 (丸棒型) を用いた。コンクリート圧縮強度は耐火試験時 41.3MPa であった。また、PC 鋼棒は 2 段に配置し、加熱区間は梁の中心から左右 1700mm とした。部材表面から PC 鋼材中心位置までは 87.5mm, 175mm である。加熱は ISO834 の標準加熱曲線に従い、加熱時間は 210 分である。加熱面は梁下面および両側面の 3 面である。表-7 に PC 鋼材とコンクリートの常温時力学性状を表す。



(単位 : mm)

図-5 解析対象 PC 梁の断面およびモーメント図

表-7 PC 鋼材とコンクリートの常温時力学性状

PC 鋼材			コンクリート		
鋼種	$f_y$ (MPa)	$E_s$ (MPa)	$f'_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$E_c$ (MPa)
公称径 12mm SBPR 1080/1230	1166	$2.01 \times 10^5$	41.3	3.5	$3.02 \times 10^4$

常時荷重作用時に、梁にひび割れが生じないようにプレストレス導入力を設定した。表-8 に PC 部材の設計詳細を表す。曲げ耐力  $M_u$  の計算には平面保持を仮定し、ACI 応力ブロックを使用した。表中の常時荷重  $M_{L+D}$  は曲げ破壊に対して考慮される荷重係数 1.7 に基づいて設定した。

$$M_{L+D} = \frac{M_u}{1.7} = 76.75 \cong 70.00(\text{kNm})$$

$M_{L+D}$  を発生させるのに必要な集中荷重  $P$  は、41.17kN となる。常時荷重時に予想されるたわみ  $\delta$  は、断面のひずみ分布から曲率を求め、これを積分することにより求めた。

表-8 PC 梁の設計詳細

$M_u$ (kNm)	$M_{L+D}$ (kNm)	荷重係数	常時荷重(kN)	$\delta$ (mm)
130.48	70.00	1.7	41.17	5.38

なお、たわみ計算ステップ  $t_i$  を加熱開始後 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 分と設定し、5 で示したクリープ試験結果から各ステップごとのクリープひずみを調べた。その結果、2, 27, 51, 138, 228, 382, 562, 782 $\mu$  となる。

これらのクリープひずみを式(2)~(8)に適用することで、高温時におけるプレストレス力  $P_i$ 、断面のひずみ分布および曲率  $\phi$  が得られる。

### 6.2 鋼材のクリープによるひび割れの発生

PC 鋼材の高温クリープひずみにより梁にひび割れが生じる場合もある。ひび割れは、断面引張縁ひずみ  $\epsilon_{t,cr}$  がコンクリート時ひび割れひずみ  $\epsilon_{cr}$  より大きい場合に生じるとした。なお、表-7 のコンクリート引張強度に対応するひび割れ時ひずみは 116 $\mu$  となる。各加熱時間における各断面の引張縁ひずみの計算結果を図-6 に示す。図中の (-) 値は圧縮を表している。

図に示すように加熱開始後 20 分までは、ひび割れは生じていない。40 分になると断面 E, F においてひび割れが生じる。本研究では、加熱開始 40 分以後は、PC 梁部材の全断面にひび割れが発生していると考え、たわみを算定する。

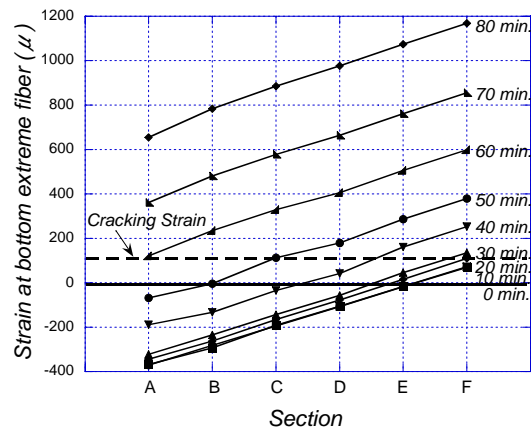


図-6 各断面における引張縁ひずみ

### 6.3 PC 梁中央たわみ

PC 梁中央部におけるたわみ計算結果を表-9 に示す。表中の記号  $\varepsilon_{s,cr}$  は PC 鋼材に生じた高温クリープひずみ、 $\varepsilon_{c,cr}$  はクリープひずみによって変化した圧縮縁ひずみ、 $\varepsilon_{t,cr}$  はクリープひずみによって変化した引張縁ひずみ、 $x$  は中立軸位置、 $\varphi$  は曲率、 $\delta$  は部材たわみ量である。加熱時のたわみ変化を図-7 に示す。なお、図には PC 梁の耐火試験より得られたたわみ測定値を併せて示す。

図より、PC 鋼材のクリープひずみによるたわみ計算値は、加熱後 40 分から増加し始め、80 分において約 17mm となる。これは実験値に対して約 1/2 の値である。本計算結果を見る限り PC 鋼材の高温クリープひずみが部材たわみに及ぼす影響は大きいと言える。

表-9 中央たわみ計算結果

加熱時間 $t_i$ (分)	$\varepsilon_{s,cr}$ ( $\mu$ )	$\varepsilon_{c,cr}$ ( $\mu$ )	$\varepsilon_{t,cr}$ ( $\mu$ )	$x$ (mm)	$\varphi$ ( $\times 10^{-6}/\text{mm}$ )	$\delta$ (mm)
0	0	509	70	308	1.65	5.38
10	2	510	72	306	1.66	5.41
20	27	521	109	289	1.80	5.86
30	51	501	134	276	1.82	5.91
40	138	507	253	234	2.17	7.05
50	228	527	379	203	2.59	8.42
60	382	569	599	170	3.34	10.84
70	562	619	855	147	4.21	13.70
80	782	677	1168	128	5.27	17.14

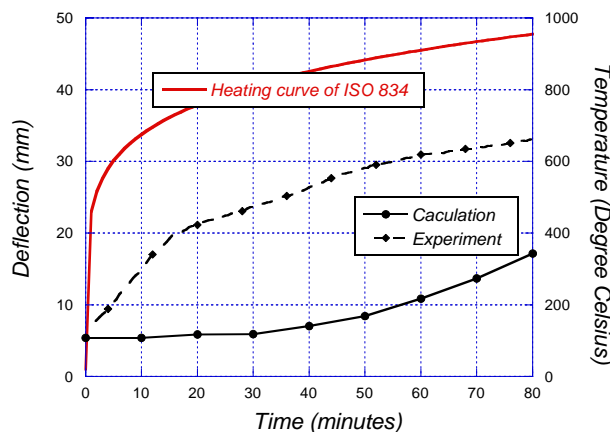


図-7 高温時における PC 梁中央たわみ変化

### 7. まとめ

本研究では、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について検討を行った。その結果を以下にまとめる。

1) PC 鋼材の高温時クリープひずみによる梁部材たわみ

の算定方法を提案した。

2) この算定方法に基づいて筆者らが行った耐火試験でを使用した PC 梁に対して PC 鋼材高温クリープひずみによるたわみ予測を行った。

3) その結果、PC 鋼材の高温クリープひずみが部材たわみに及ぼす影響は全たわみ量の約 1/2 となった。

今後は PC 鋼材の高温クリープ以外の要因であるコンクリート弾性係数の低下、断面 2 次モーメントの低下、試験体内部温度分布による熱応力を考慮した高温時 PC 部材のたわみ評価方法について提案していく予定である。

### 謝辞

クリープ試験の際に PC 鋼棒と実験施設を提供して頂いた高周波熱錬 (株) に感謝いたします。また、本研究を進めるにあたり、京都大学大学院生大田周平氏に御協力頂いた。ここに感謝を示す。

### 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 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
- 3) 林 真理子, 谷 昌典, 西山 峰広, 原田 和典：PC ストランド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.837-838, 2007
- 4) 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
- 5) 2001 年版耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説 井上書院 2001
- 6) 林 成俊, 古沢 陽子, 谷 昌典, 原田 和典, 西山 峰広：プレストレストコンクリート梁の高温時力学性状に関する研究 (その 1~2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 915-918, 2008
- 7) 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