

# 躯体構築に伴う施工荷重による Fc100N/mm<sup>2</sup> 高強度コンクリート柱のクリープひずみ

## Creep of Reinforced Concrete Columns using 100N/mm<sup>2</sup> High- Strength Concrete to Construction Load

河野政典\* 細矢 博\* 起橋孝徳\*

### 要 旨

実建物における 100N/mm<sup>2</sup> 級コンクリートのクリープひずみを把握するため、実建物において長期にわたるひずみ計測と、室内でのクリープ試験を実施し、躯体構築に伴う柱のクリープひずみおよび軸方向ひずみについて検討した。クリープ試験の結果、材齢 28 日から軸力比 0.20 で載荷した場合、載荷材齢 2 年 (730 日) のクリープ係数は 0.49 で、終局クリープ係数は 0.59 であることがわかった。室内クリープ試験から得られたクリープ係数を実建物の柱断面で補正し、躯体構築ごとに生じる弾性ひずみにクリープひずみを累加し求めた予測ひずみは、実建物の測定ひずみと良い対応を示し、本検討方法により、躯体構築過程における躯体荷重の増加に伴う軸方向ひずみの推移を予測できることを確認した。

キーワード : Fc100N/mm<sup>2</sup>、高強度コンクリート、クリープ、施工荷重

### 1. まえがき

近年、都心部の集合住宅では、土地の高度利用から超高層化が進みつつあり、また、平面設計の自由度、快適空間の確保から大スパン化が望まれている。超高層化、大スパン化によって、下層階の柱には高軸力が作用することとなるが、柱部材は居住性の確保から断面寸法の大きさが制限される。コンクリートの高強度化は、建物の超高層化、大スパン化を実現する有効な手段であり、昨今、都心部では、超高層鉄筋コンクリート造集合住宅に 100N/mm<sup>2</sup> 級高強度コンクリートが適用される事例が増えつつある<sup>1)</sup>。

100N/mm<sup>2</sup> 級コンクリートは、超高層建物の低層階の柱に適用されるため、長期間にわたり躯体構築に伴う軸力が増加し続け、弾性ひずみに加え、クリープひずみもそれに伴い増加すると考えられる。100N/mm<sup>2</sup> 級コンクリートのクリープひずみについては、室内試験レベルでの研究報告<sup>2)</sup>はされているものの、実建物におけるクリープひずみに関する報告<sup>3)</sup>は少ない。実建物におけるクリープひずみの把握およびデータの蓄積は、構造解析の精度向上に役立てることができ、また、仕上げ工事に関わる不具合を未然に防ぐ上でも必要である。そこで、実建物における 100N/mm<sup>2</sup> 級コンクリートのクリープひずみを把握するため、実建物において長期にわたるひずみ計測と、室内でのクリープ試験を実施し、柱のクリー

プひずみ、および軸方向ひずみについて検討した。本報ではその結果について報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 実験計画

実建物においてひずみ計測を実施したのは、設計基準強度 (以下、Fc と称す) 100N/mm<sup>2</sup> コンクリートを適用した地上 41 階建ての超高層鉄筋コンクリート造集合住宅の 1 階柱である。柱の形状を図-1 に示す。柱の断面寸法は 1100×1100mm、高さ 4960mm で、軸方向鉄筋は

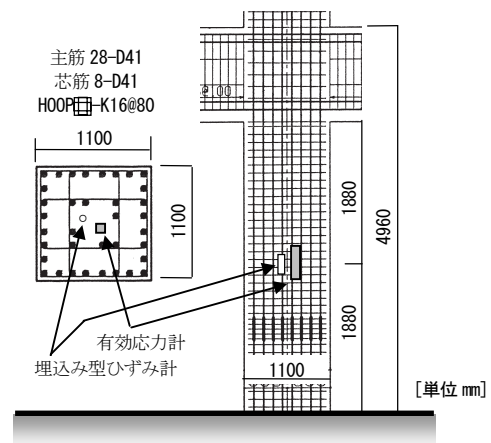


図-1 実建物の柱の形状

\* 技術研究所

D41 が主筋と芯筋で計 36 本配筋されている。1 階柱のコンクリート打設と同時に、同一コンクリートを用いて実建物の柱と同一断面で同一配筋の高さ 1000mm の有筋模擬柱（上下面断熱）と、無筋模擬柱（上下面断熱）を製作し、有筋模擬柱では無載荷状態のひずみ測定を、無筋模擬柱ではコアを採取し、構造体コンクリート強度を確認した。

また、クリープ係数を得るため、同一コンクリートで製作した供試体を用い、実験室内でクリープ試験を実施した。

2.2 使用材料と調合

Fc100N/mm<sup>2</sup> コンクリートの使用材料を表-1に、調合を表-2に示す。セメントには、低熱ポルトランドセメントにシリカフェームをセメント工場において 10% 内割りでプレミックスしたシリカフェームセメントと中庸熱ポルトランドセメントを、質量比 4 : 6 の割合で混合使用した。また、添加材としてポリエステル繊維（密度 1.39g/cm<sup>3</sup>）を 0.1vol% 加えた。

圧縮強度の管理材齢は 28 日とし、調合管理強度（Fc +<sub>28</sub>S<sub>91</sub>）は 107N/mm<sup>2</sup> で、水セメント比は 19.7% である。スランプフローの管理値は、繊維添加後荷卸しの段階で 65±10cm、空気量は 2.0±1.5% とした。

2.3 測定項目

測定項目を表-3に示す。構造体コンクリート強度およびヤング係数の測定を材齢 52 週まで行った。柱ひずみの測定には測温機能付き埋込み型ひずみ計を、柱軸力の測定には有効応力計を用いた。ひずみ計および有効応力計の設置位置を図-1に示す。有筋模擬柱におけるひずみ測定位置は、柱断面および高さ方向の中心位置とした。

クリープ試験では、図-2に示す試験装置を用い、供試体にはφ10×20cm の 3 個の円柱供試体を用いた。現

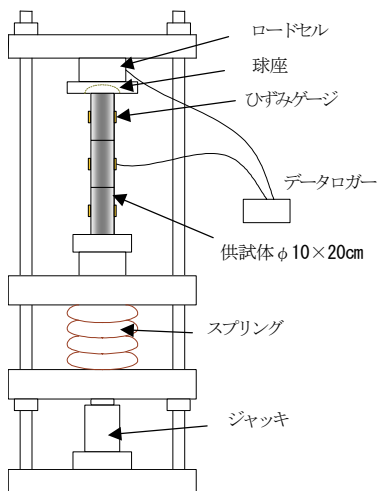


図-2 クリープ試験装置

表-1 コンクリートの使用材料

種別	記号	銘柄・産地等	物性値
セメント	SFC	シリカフェームプレミックス 低熱ポルトランドセメント	密度:3.08 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:6350 cm <sup>2</sup> /g シリカフェーム内割り 10%
	MC	中庸熱 ポルトランドセメント	密度:3.21 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:3760 cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	富津産山砂	表乾密度:2.60 g/cm <sup>3</sup> 吸水率:1.27%、F.M. 2.46
粗骨材	G	桜川産 硬質砂岩碎石	表乾密度:2.65 g/cm <sup>3</sup> 吸水率:0.62% 実積率:61.5%
化学 混和剤	Add	高性能減水剤	ポリカルボン酸系 密度:1.07 g/cm <sup>3</sup>

表-2 コンクリートの調合

調合管理 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					空気量 (%)
		W	C		S	G	
			SFC	MC			
107	19.7	165	335	503	621	824	2.0

・ 調合強度

$$F_m = F_c + {}_{28}S_{91} + 2\sigma = 127\text{N/mm}^2$$

F<sub>m</sub> : 調合強度 (N/mm<sup>2</sup>)

F<sub>c</sub> : 設計基準強度 F<sub>c</sub> = 100N/mm<sup>2</sup>

n<sub>S</sub>m : 強度補正值 <sub>28</sub>S<sub>91</sub> = 7 N/mm<sup>2</sup> (冬期)

σ : 標準偏差 σ = 10N/mm<sup>2</sup>

表-3 測定項目

種別	項目	方法
柱部材 (現場)	構造体圧縮強度	無筋模擬柱のコア供試体
	ヤング係数	材齢 4、13、26、52 週
	柱ひずみ (有筋模擬柱)	測温機能付き埋込み型ひずみ計 (標点距離 100mm、見かけの弾性 係数約 40N/mm <sup>2</sup> )を設置
	1 階柱軸力	有効応力計を設置
クリープ 試験 (実験室)	自由ひずみ (無載荷)	φ10×20cm (3 個) 測定開始までの養生: 材齢 1 週まで簡易断熱養生、そ の後 28 日まで現場封緘養生
	クリープ ひずみ (載荷)	試験環境: 気温 20±2°C、湿度 60±5% ひずみ測定方法: ひずみゲージ (WSG ゲージ長 60mm) を側面に 2 箇所貼付け
	載荷荷重	ロードセル 載荷開始材齢: 材齢 28 日 載荷荷重: 0.25F <sub>c</sub> (= 25N/mm <sup>2</sup> )

場でのコンクリート打設時に供試体を製作し、材齢 1 週まで簡易断熱養生を、その後現場封緘養生を行った。材齢 28 日から温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度  $60 \pm 5\%$  の室内環境で荷重を開始した。荷重荷重は、実建物の設計軸力である  $0.25F_c$  ( $25\text{N}/\text{mm}^2$ ) とした。同時に、無荷重の供試体も 3 個製作し、自由ひずみの測定を行った。各供試体の側面 2 箇所にはひずみゲージを貼付けひずみを測定し、その平均値を 1 供試体のひずみ値とし、3 供試体の平均値を求めた。

### 3. 測定結果

#### 3.1 圧縮強度とヤング係数

無筋模擬柱から採取したコアの圧縮強度とヤング係数の測定結果を図-3 に示す。材齢 13 週の圧縮強度は  $121\text{N}/\text{mm}^2$  で、 $F_c$  を満足した。材齢 52 週では  $137\text{N}/\text{mm}^2$  であった。ヤング係数は、材齢 26 週までほとんど変わらず約  $42\text{kN}/\text{mm}^2$  で、材齢 52 週では  $44.4\text{kN}/\text{mm}^2$  となった。

#### 3.2 柱ひずみ

無荷重状態の有筋模擬柱のひずみ測定結果を図-4 に、柱中心部と端部のコンクリート温度を図-5 に示す。柱中心部のコンクリートの温度は約  $80^\circ\text{C}$  まで達した。ひずみの測定値については、コンクリートの線膨張係数を  $9.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  とし、温度変化によるひずみ変化分を補正した。柱部材に用いたコンクリートの水セメント比が 20% 以下で、かつ、部材断面が大きいため、測定されたひずみのほとんどが自己収縮ひずみと考えられる。材齢 5 日のひずみは約  $300 \times 10^{-6}$  で、それ以降のひずみ変化はみられなかった。

有効応力計から得られた 1 階柱部材の圧縮応力とひずみ測定結果を図-6 に示す。ひずみ測定値については温度補正を同様に行った。躯体コンクリートの打設は 1 階柱の打設から約 400 日後に完了し、ひずみ測定を材齢 650 日まで行った。躯体施工階の上昇に伴い圧縮応力とひずみが増加し、材齢 400 日の応力は約  $19\text{N}/\text{mm}^2$ 、柱ひずみは約  $680 \times 10^{-6}$  であった。

#### 3.3 クリープ係数

クリープ試験の測定結果として荷重荷重、荷重試験体の全ひずみ、および自由収縮試験体のひずみの推移を図-7 に、測定結果から求めたクリープ係数の推移を図-8 に示す。荷重開始時のクリープ試験供試体強度は  $127\text{N}/\text{mm}^2$  で、荷重応力比（軸力比）は 0.20 であった。荷重材齢 2 年の全ひずみは  $1031 \times 10^{-6}$ 、自由ひずみは  $150 \times 10^{-6}$  となり、クリープひずみは  $291 \times 10^{-6}$ 、クリープ係数は 0.49 であった。クリープひずみは 2 年以降も微増する傾向がみられた。片寄らは、初期材齢に高温履歴を受けた圧縮強度  $100\text{N}/\text{mm}^2$  以上の高強度コンクリートのクリープ試験を実施し、初期

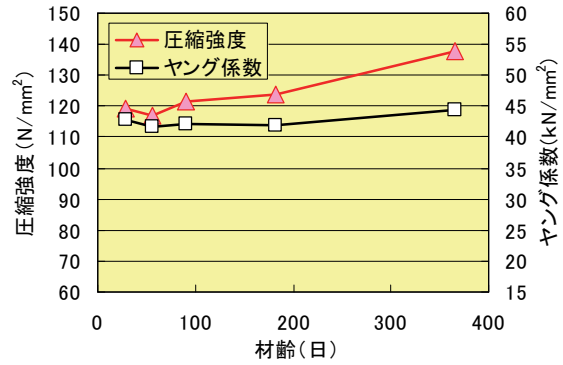


図-3 コアの圧縮強度とヤング係数

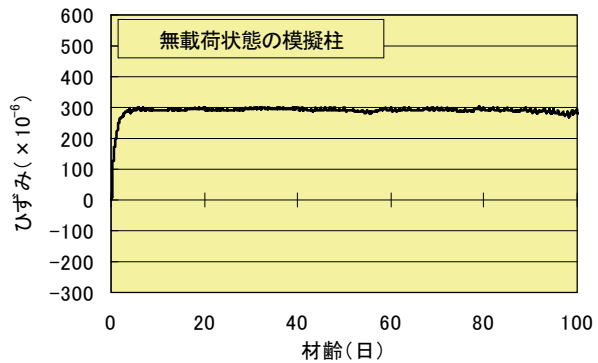


図-4 無荷重有筋模擬柱のひずみの推移

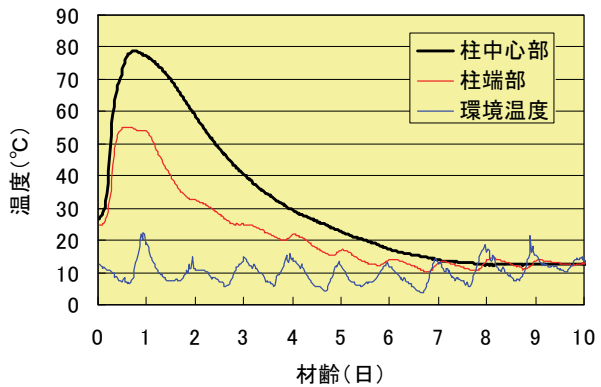


図-5 柱中心部と端部のコンクリート温度

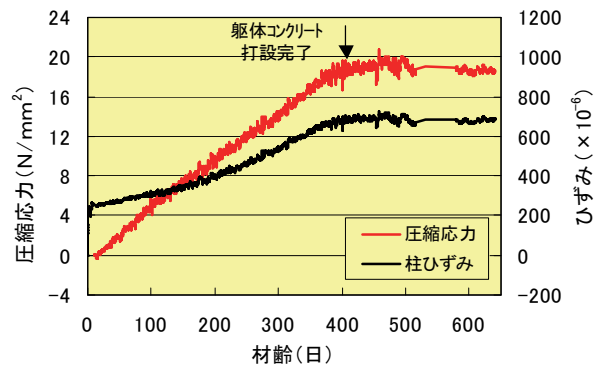


図-6 1 階柱圧縮応力とひずみの推移

材齢に高温履歴を受けた場合、クリープひずみが小さくなることを報告している<sup>5)</sup>。今回クリープ試験に用いた供試体は、簡易断熱養生を行ったもので、養生中の最高温度が63.2℃の高温履歴を受けており、今回得られたクリープ係数は、片寄らの報告で示されているクリープ係数の範囲に含まれる値であった。

CEB-FIP MODEL CODE 1990<sup>6)</sup>では、クリープ係数の推定式(以下、MC90式と称す)として式(1)が示されている。ここで、実験データを近似する式(1)の $\phi_0$ と $\beta_H$ を求めた結果、終局クリープ係数 $\phi_0$ は0.59、 $\beta_H$ は710であった。その数値を式(1)に代入した近似曲線を図-8に併せて示す。本近似式からクリープひずみの推移を予測することが可能と考えられる。

$$\phi_{(t,t_0)} = \phi_0 \left[ \frac{(t-t_0)/t_I}{\beta_H + (t-t_0)/t_I} \right]^{0.3} \quad (1)$$

ここに、 $\phi_{(t,t_0)}$ : 材齢 $t_0$ 日に載荷された材齢 $t$ 日のクリープ係数  
 $\phi_0$ : 終局クリープ係数  
 $\beta_H$ : クリープの進行速度を決める係数  
 $t_I$ : 1日

#### 4. 躯体構築に伴う柱の軸方向ひずみ

##### 4.1 検討方法

測定した柱のひずみは、乾燥収縮、自己収縮、圧縮応力による弾性ひずみ、およびクリープひずみの総和と考えられる。測定対象柱の上部のコンクリート打設は、柱の打設から12日以降であった。したがって、材齢12日までに生じるひずみは、乾燥収縮と自己収縮ひずみによるものとした。また、模擬柱部材のひずみから、材齢5日以降ではひずみの変化がみられなかったことから、材齢12日以降、乾燥収縮と自己収縮ひずみの増加は生じないと仮定した。なお、既往文献で、100N/mm<sup>2</sup>級実大RC柱部材の無載荷状態のひずみ測定結果について今本から報告されており、本測定結果同様、初期材齢に高温履歴を受けたため、材齢5日以降のひずみ変化がほとんどみられなかったことが報告されている<sup>7)</sup>。

以上から、本検討では、材齢12日までの測定ひずみに、圧縮応力による弾性ひずみとクリープひずみを加えたものを予測ひずみとした。

##### 4.2 施工荷重の設定とクリープひずみ

1フロアあたりの施工荷重による圧縮応力は、有効応力計による測定結果から0.47N/mm<sup>2</sup>とし、3階までの施工荷重は、実施工程通りの材齢で、標準階となる4階以上は、10日サイクルで1フロアの施工荷重が加わるものとした。1階柱に作用する圧縮応力の設定を図-9に示す。

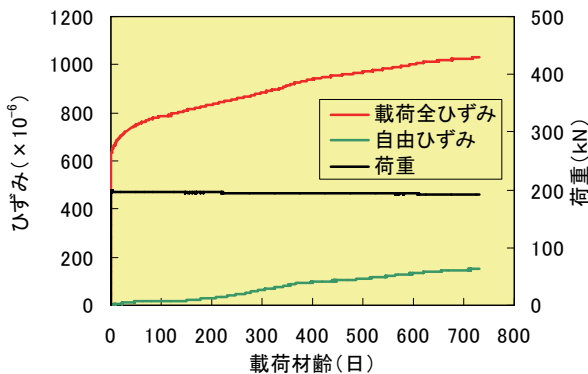


図-7 クリープ試験測定結果

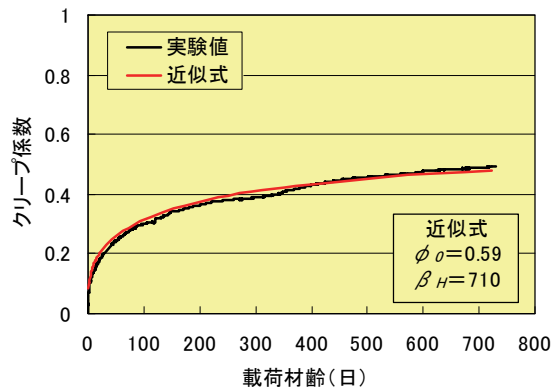


図-8 クリープ係数の推移

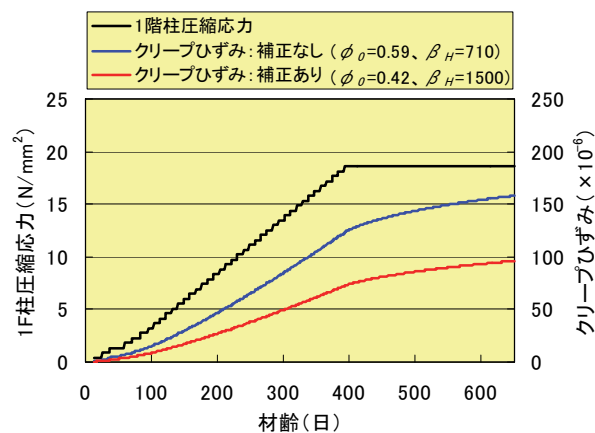


図-9 施工荷重の設定とクリープひずみ

柱部材のヤング係数は、コンクリート部分ではコア強度の測定結果から試験平均値の43.0kN/mm<sup>2</sup>、鉄筋は210kN/mm<sup>2</sup>とし、部材断面と配筋の面積比から49.7kN/mm<sup>2</sup>として、弾性ひずみを求めた。

施工荷重によるクリープひずみは、各階のコンクリート打設ごとにクリープひずみが累加するものとし、式(2)から求めた。

$$\varepsilon_{(t)} = \sum_{n=2}^{41} n \varepsilon_{(t, n t_I)} \quad (2)$$

$$n\varepsilon(t, t_0) = n\phi(t, n t_0) \cdot nN / (I_c A \cdot I_c E) \quad (3)$$

$$n\phi(t, n t_0) = \phi_0 \left[ \frac{(t - n t_0) / t_1}{\beta_H + (t - n t_0) / t_1} \right]^{0.3} \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon(t)$  : 1 階柱の材齢  $t$  日のクリープひずみ  
 $n\varepsilon(t, n t_0)$  : 材齢  $n t_0$  日に打設された  $n$  階の躯体荷重( $nN$ )に対する材齢  $t$  日のクリープひずみ  
 $n\phi(t, n t_0)$  : 材齢  $n t_0$  日に打設された  $n$  階の躯体荷重( $nN$ )に対する材齢  $t$  日のクリープ係数  
 $nN$  :  $n$  階の躯体荷重  
 $I_c A$  : 1 階柱の断面積(有効断面積)  
 $I_c E$  : 1 階柱のヤング係数(有効ヤング係数)  
 $t$  : 1 階柱打設後の材齢  
 $n t_0$  :  $n$  階コンクリート打設日の 1 階柱の材齢( $n$  階の躯体荷重の載荷開始材齢)

クリープひずみの算出に用いる  $\phi_0$  と  $\beta_H$  は、今回の室内クリープ試験結果から得られているが、本試験で得られた値は直径 10cm の供試体のものである。柱部材の断面は 1100×1100mm であるため、断面寸法の違いによりクリープ特性が供試体と異なると考えられる。今本らは、断面寸法の影響について、超高強度領域まで MC90 式で評価が可能であると報告しており<sup>8)</sup>、また、小室らは、実大柱においても MC90 式で断面寸法の影響を概ね評価できると報告している<sup>3)</sup>。

そこで、本検討においても、MC90 式を用いて部材断面の違いによる  $\phi_0$  と  $\beta_H$  の補正を行うこととした。MC90 式の  $\phi_0$  と  $\beta_H$  の算出式を、式(5)、式(10)に示す。部材断面の違いは、式(6)の  $\phi_{RH}$  と式(10)の  $\beta_H$  に影響する。それぞれの断面寸法を入力し、値を比較した。その結果を表-4 に示す。柱部材の  $\phi_{RH}$  は直径 10cm の供試体の 0.71 倍、 $\beta_H$  は 3.31 倍となった。この比率をクリープ試験より得られた  $\phi_0$  と  $\beta_H$  に乗じ、補正値を算出した。補正値の算出結果を表-4 に併せて示す。なお、 $\beta_H$  は MC90 式において 1500 以下とされているため、 $\beta_H$  の補正値は 1500 とした。補正した係数を用いて式(2)~式(4)より算出したクリープひずみと、補正なしのクリープひずみを図-9 に示す。柱断面で補正したクリープひずみは、補正前のひずみの約 60% となった。

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (5)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{1/3}} \quad (6)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} \quad (7)$$

表-4 部材断面の形状の違いによる  $\phi_{RH}$  と  $\beta_H$

	計算結果			補正値 ( $\phi_0$ , $\beta_H$ )
	供試体 $\phi$ 100mm	柱部材 $\square$ 1100mm	比率 (柱/供試体)	
$\phi_{RH}$	2.10	1.49	0.71	( $\phi_0$ ) 0.42
$\beta_H$	325	1077	3.31	( $\beta_H$ ) 1500

計算条件 RH=60%

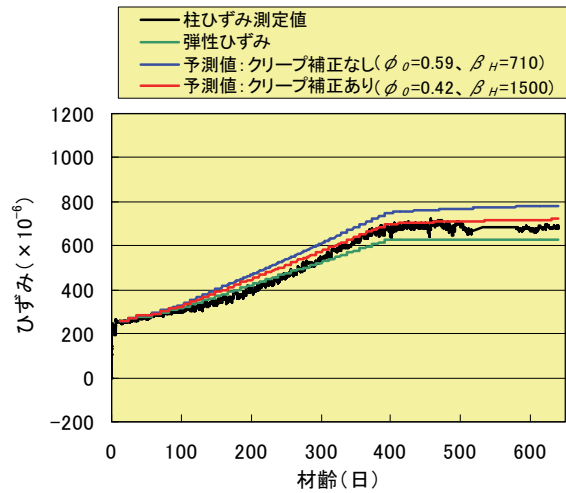


図-10 柱ひずみの測定値と計算値の比較

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}} \quad (8)$$

$$h = 2A_c/u \quad (9)$$

$$\beta_H = 150 [1 + \{1.2(RH/RH_0)\}^{1.8}] (h/h_0) + 250 \leq 1500 \quad (10)$$

ここに、RH : 相対湿度(%),  $RH_0$  : 100%  
 $h$  : 仮想部材厚(mm),  $h_0$  : 100mm  
 $A_c$  : 部材断面積(mm<sup>2</sup>)、  
 $u$  : 部材断面の外気に接する部分の長さ(mm)  
 $f_{cm}$  : 材齢 28 日圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_{cm0}$  : 10N/mm<sup>2</sup>

### 4.3 測定データと予測値の比較

材齢 12 日までの柱の測定ひずみに、設定した施工荷重による弾性ひずみを加えたものと、さらに、クリープひずみを加えた予測値を図-10 に示す。予測値には、柱断面によるクリープ係数の補正を行ったものと、未補正のものを示す。補正を行った予測ひずみは、測定値と良い対応を示した。したがって、供試体によるクリープ試験結果から得られたクリープ係数を断面形状により補正し、各階の打設ごとの圧縮応力によって生じるクリープひずみを累加することにより、施工荷重によるクリープひずみの予測が十分可能であると考えられる。

#### 4.4 軸方向ひずみの予測

以上の検討結果から、躯体コンクリートの打設完了以降（躯体構築後）においては、軸力の増加がない、すなわち弾性ひずみの増加がないと仮定した場合の、今後の1階柱の軸方向ひずみ予測を図-11に示す。躯体構築過程では、柱ひずみの増加が大きい、躯体構築直後から5年経過までのひずみは微増で、それ以降のひずみの増加は極めて小さいことが予測される。

柱内法高さが3.8mの場合における柱の収縮ひずみ量を表-5に示す。打設直後から躯体構築直後までの、躯体荷重による弾性ひずみ、クリープひずみ、および、自己収縮を含む収縮量は2.65mmと推定されるが、躯体構築後の収縮量、すなわちクリープ収縮量は、構築直後から5年経過時点で0.21mmであり、極めて小さい。

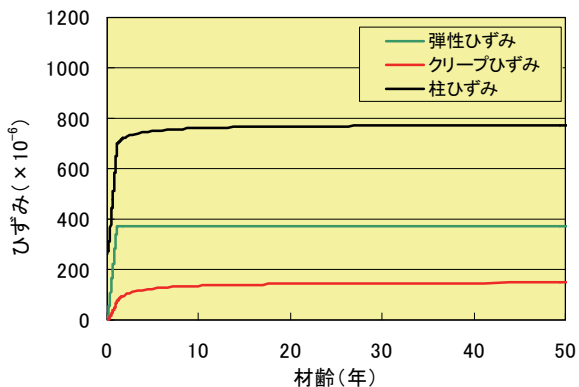


図-11 1階柱軸方向ひずみの予測

表-5 柱の収縮ひずみ量(柱内法高さ3.8mの場合)

	収縮量(mm)			
	躯体構築直後まで	構築後1年経過	構築後2年経過	構築後5年経過
柱全収縮量*	2.65	2.76	2.80	2.86
クリープ収縮分	0.28	0.39	0.43	0.49
クリープ収縮増加分	—	(直後~1年) 0.11	(1~2年) 0.04	(2~5年) 0.06
		(躯体構築直後~5年) 0.21		

\*柱全収縮量=自己収縮(1.42mm)+弾性収縮(0.95mm)+クリープ収縮

#### 5. まとめ

Fc100N/mm<sup>2</sup> 高強度コンクリートのクリープ試験、および実建物における柱部材の長期間のひずみ計測を行い、躯体構築に伴う柱のクリープひずみ、および軸方向ひずみについて検討した。その結果を以下に示す。

- i. 材齢28日から軸力比0.20で載荷したクリープ試験、載荷材齢2年(730日)のクリープ係数は0.49で、終局クリープ係数は0.59であった

- ii. 室内クリープ試験から得られたクリープ係数を実建物の柱断面で補正し、躯体構築ごとに生じる弾性ひずみにクリープひずみを累加することにより、躯体荷重の増加に伴う軸方向ひずみの推移を予測できる
- iii. 躯体構築後もクリープひずみは微増するものの、収縮量は極めて小さいことを確認した

#### 6. あとがき

今回のクリープ試験、および実建物における柱部材のひずみ計測の結果、打設直後から躯体構築までの柱の収縮量は約3mmとなるが、躯体構築後のクリープによる収縮量は小さいことがわかった。今回の得られたクリープ性状を踏まえ、低層階の仕上工事を実施すれば、軸方向の収縮による仕上工事の不具合を未然に防ぐことができると考えられる。また、躯体の構築過程において逐次、GLを基準とした躯体構築階レベルの見直し、調整を行うことが重要であることがわかり、貴重なデータが得られた。

#### 【参考文献】

- 1) 例えば、黒岩秀介、河合邦彦、小田切智明、嵐山正樹、「Fc130N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートを用いた超高層集合住宅の施工」、コンクリート工学、Vol.42、No.10、pp.44-49、2004.10
- 2) 例えば、日本建築学会、「高強度コンクリートの技術の現状(2009)」、pp.125-126、2009.10
- 3) 小室 努、今井和正、是永健好、渡邊史夫、「超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の施工過程を考慮したクリープ予測法」、日本建築学会構造系論文集、第616号、pp.165-172、2007.6
- 4) 梶田秀幸ほか、「超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究 その3 線膨張係数」、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1、pp.259-260、2007
- 5) 片寄哲務、横須賀誠一、西田浩和、佐々木仁、「初期高温履歴を受けた超高強度コンクリートの圧縮クリープ」、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.2、pp.115-120、2007.6
- 6) Comite Euro-International du Beton、「CEB-FIP MOD EL CODE 1990」
- 7) 今本啓一、「超高強度コンクリート実大柱の自己収縮応力に及ぼす水和熱の影響」、日本建築学会構造系論文集、第503号、pp.17-22、1998.1
- 8) 今本啓一、山本俊彦、大岡督尚、「約5年間の実測に基づくコンクリートのクリープ・収縮計法効果の評価とクリープ予測方法の提案」、日本建築学会構造系論文集、第593号、pp.9-16、2005.7