

超高層 RC 構造物の 3 次元柱クリープ解析 クリープ係数を用いた FEM 解析と簡易モデル評価比較

中山 昌 尚

概 要

超高層 RC 住宅の建設に際して、高強度コンクリートが使用されることが多い。低層階の柱に作用する長期応力度が大きくなるため、建物の長期にわたる健全性を確保するためには、柱のクリープ変形の検討が必要になっている。本報では、クリープ係数法と、3 次元 FEM 解析手法の組み合わせでこの問題を数値的に扱い、59階建コンクリート構造物のクリープ性状を示した。更に、FEM 数値解の見通しをよくするために、バイリニア型の荷重歴をうける簡易な1本柱モデルによる定式化も行ない、FEM 解とほぼ同等な結果が得られることを示した。簡易法により、問題に含まれるパラメーターの影響を検討した。今後、ここで示した解析手法による結果の妥当性を検討するためには、実測データの収集が必要である。

A Three-Dimensional Column Creep Analysis of Super High-rise Reinforced Concrete Structures

--- Comparison of FEM Analysis Using Creep Coefficient Method and Simple Estimation based on a Single column ---

Abstract

In high-rise Reinforced concrete structures, axial forces on lower storey columns tend to be high, creep phenomena in columns may present problems in securing long term structural health. In this paper, this column creep phenomena is numerically analyzed by a combination of the creep coefficient method and FEM (Finite Element Method) using ordinary beam elements and plate elements. A numerical example of 59-storey reinforced concrete structure is presented. In order to get a good perspective on the above-mentioned numerical solution, we also present a simple estimation method based on single column model with a bi-linear-type loading time history. The accuracy of this simple estimation method is also presented, and compared with the FEM solution. Through this simple method, effects of parameters involved in this problem are discussed. Verification based through field measurements of column creep phenomena is needed for the purpose of verifying validity of prediction by numerical analysis presented here.

キーワード: クリープ 柱 高強度コンクリート
超高層 クリープ係数 数値解析

§1. はじめに

超高層 RC 住宅の建設に際して、高強度コンクリートが使用され、下層階の柱に作用する長期応力度が大きくなるため、建物の長期にわたる健全性を確保するためには、柱のクリープ変形の検討が必要になって来ている。高強度コンクリートのクリープ性状の表現については、実験、実測により調査研究が行われて来ている¹⁾²⁾。現象としては、柱にクリープ現象が発生することにより、柱軸力の再配分、それに伴い、大梁のせん断力変化が考えられている。構造的な問題としての扱いとしては、1 本の柱を取り出し時間変化する荷重に対する効果を漸化式的に解くことが通常行われている。しかし荷重の再配分機構は複雑であり、骨組全体を扱い、施工過程をある程度反映させた解析手段が必要である。骨組のクリープ問題の FEM 手法による扱いについては、クリープ係数法を平面骨組に適用した例³⁾⁴⁾がある。本報ではその手法を立体問題に拡張して 59 階建ての超 RC 構造物に適用し、既報⁵⁾よりも詳しく解析結果の数値例を示す。§4 では、FEM 解に比べて比較的通しの良い方法として、荷重増加過程を単純化したモデルに基づいた簡易モデルによる評価方法を示す。この簡易評価で概ね FEM 解と整合的な結果が得られることを示し、問題に含まれるパラメーター影響が把握できることを示す。

§2. 解析方法

2.1 概要

通常の 2 節点 Beam 要素、4 節点板要素(壁が対象)を用いた立体骨組として扱う。クリープ効果は、クリープ係数として現象論的に扱い、 $\Delta \phi$ をクリープ係数増分として、見かけのヤング率が $1/(1+\Delta \phi)$ 倍になるものとする。ここでは、クリープ歪が柱部材にのみに生じるとする。文献³⁾⁴⁾では軸剛性のみに剛性低下が起きるとしたが、本報では、曲げ剛性にも影響するとしている。梁は弾性とし、梁に取り付くスラブの影響については、その有効幅に応じて、梁の曲剛性増大効果: ϕ_b を持つものとして考慮する。

部材が組みあがってゆく施工過程の表現については、柱梁、壁部材の架構への導入日、スラブ打設日を指定し、ある時間区間で存在している架構を区間ごとに確定させる。考慮する荷重は、自重+積載のみとし、等価節点荷重として扱う。

2.2 各時間区間での釣合い式と変形の累積

ある時間区間で、架構および荷重が確定する。考えている時間区間で存在する部材の集合体について、クリー

プ係数増分により剛性が低下した系、低下しない系を想定して、時間区間内での塑性変形増分(塑性は回復しないという意味)、弾性変形増分を確定する。それらに応じて、歪、部材力等の区間増分(塑性、弾性)が定まる。実現しない観測されるのは、総量(塑性増分、弾性増分の累積の和)である。

より具体的には、考えている時間区間で存在する部材の集合体について次の釣り合い方程式を解く。

$$[K(\Delta \phi)] \Delta u = b \quad (1)$$

b : 荷重ベクトル Δu : 増分変位

$[K(\Delta \phi)]$ 全体剛性マトリックス $\Delta \phi$ は各部材の考えている時間区間でのクリープ係数増分の関数であることを意味する。 $\Delta \phi = 0$ 時は弾性剛性を意味する。各区間で次表の 3 ケースの変位増分解を求める。

表 1 各時間区間で求める変位増分解

ケース	軸剛性への $\Delta \phi$	方程式の荷 重項 b	変位増分解 の名称
a	$\Delta \phi = 0$	Δf	Δu_a
b	$\Delta \phi \neq 0$	$f_0 + \Delta f (=f_1)$	Δu_b
c	$\Delta \phi = 0$	$f_0 + \Delta f (=f_1)$	Δu_c

f_1 : 今の区間での荷重 f_0 : 前の区間での荷重

Δf : 前の Step からの荷重増分 $= f_1 - f_0$

この変位増分解を用いて次のようにこの区間までの総(累積)変位を算定する。

$$\text{弾性変位 } u_{e1} = u_{e0} + \Delta u_a \quad (2)$$

$$\text{塑性変位 } u_{p1} = u_{p0} + \Delta u_b - \Delta u_c \quad (3)$$

総変位

$$u_{t1} = u_{e1} + u_{p1} = u_{t0} + \Delta u_a + \Delta u_b - \Delta u_c \quad (4)$$

全く同様に、増分変位解 Δu_a 、 Δu_b 、 Δu_c に対して各々定まる増分部材力から、部材力(弾性変形、塑性変形による部材力の和)が定められる。最初の区間では、 u_{e0} u_{p0} u_{t0} は 0 である。

§3. 解析対象と解析結果

3.1 解析対象モデル

平面 54mx36m(X,Y 方向スパン 6m) 59 階(階高 3.3m)の超高層 RC 建物(図 1、図 2)を想定する。柱断面は 90cmx90cm、梁は 70cmx70cm とし、ならしの重量は 2378.Tonf/階を想定した。梁の曲げ剛性増大係数 ϕ_b は外周で 1.5、その他で 2.0 とした。骨組の構築速度は 7 日/階を想定した。時間原点は 1 階梁、スラブが設置された

日とした。このスケジュールでは、上棟は、413 日目となる。上棟までは 1 日単位、それ以降は 30 日間隔で約 10 年間分を計算した。

なお、柱のクリープ係数 $\phi(t)$ の時間変化は代表的関数形として文献⁶⁾より修正 CEB 式を採用している。

$$\phi(t) = \phi_{\infty} \left(\frac{t - t_s}{\beta_H + t - t_s} \right)^{\alpha_c} \quad (5)$$

ϕ_{∞} は収束クリープ係数値、 t は時間、 t_s はクリープの開始日(部材設置日とみなす)である。なお、 $\alpha=0.3$ 、 $\beta_H=1500$ 日とした。表1で ϕ_{∞} の値は、コンクリート強度: F_c の他に、相対湿度影響: ϕ_{RH} 、クリープ開始時の材齢影響 $\beta(t_0)$ が関係することになっているが、ここでは $\phi_{RH}(h)=1.504$ 、 $\beta(t_0)=\beta(28 \text{ 日})=0.4884$ と固定して F_c のみの関数として設定している。この条件は、相対湿度 50%、プレキャスト部材想定に対応するものである。表1に諸定数をまとめて示す。

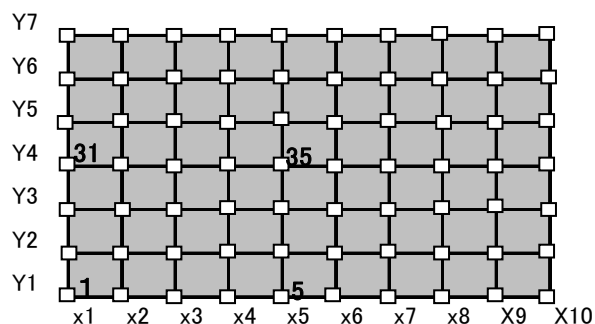


図1 平面図

番号は後で引用する層内柱 No を意味する。

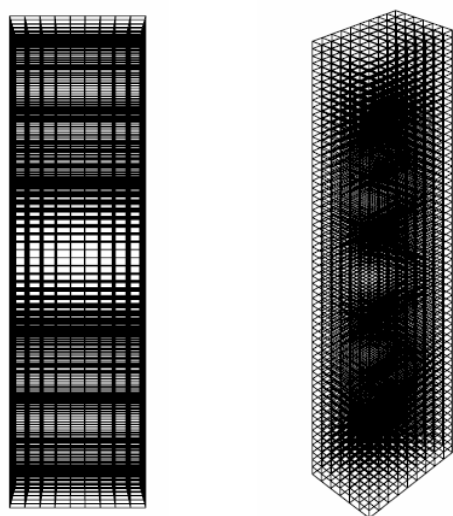


図2 対象建物骨組図

表1 部材の諸定数

階	柱			階	梁	
	$F_c \text{ N/mm}^2$	ϕ_{∞}	$E \text{ Tonn/cm}^2$		$F_c \text{ Kg/cm}^2$	$E \text{ Tonn/cm}^2$
1~10	969	0.91	391	1~10	612	344
11~20	816	1.05	369	11~20	561	325
21~30	663	1.25	344	21~30	510	315
31~40	459	1.70	304	31~40	459	304
41~50	367	2.05	283	41~50	367	283
51~59	367	2.05	283	51~RF	367	283

断面は全層で柱 90cmx90cm 梁 70cmx70cm

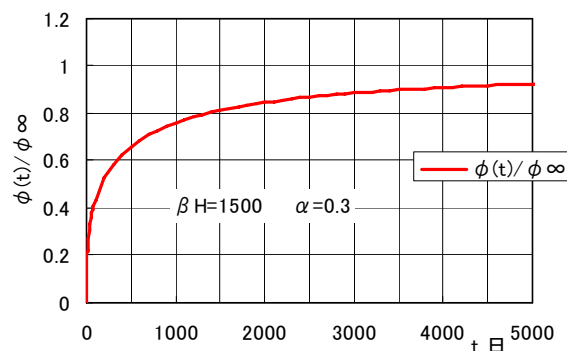


図3 想定したクリープ係数の時間変化((5)式)

3.2 解析結果

図4から10に解析結果例を示す。図4は1階柱軸力の時間変化を示したもので上棟以降軸力が頭打ちになっている状況を示している。図5は、1階柱軸歪の時間変化を示している。図4で軸力が一定になってからも、柱軸歪が漸増する典型的な傾向を示している。ここでの解析結果では、1階柱の最大軸歪で約 900 μ 程度(内弾性歪は 650 μ 程度)になっている。

図6は、クリープを考慮した約10年後の1階柱軸力を弾性解析結果(完成骨組に荷重が一気に作用)、名目上の柱荷重から算定される軸力と比較したものを示す。ここで、名目上の柱荷重とは、骨組の再配分効果を考慮することなく、各階の柱の鉛直荷重分担分を下から上まで単純に加算したものを言う。この図から明らかに、名目上の柱荷重に対してはズレが大きいこと、存在軸力のクリープ解析結果は弾性解析結果と概ね近いことがわかる。

図7は、柱軸歪について、図6と同様の比較を行なったものである。クリープを考慮した歪は弾性歪よりも大きく、クリープ現象により、柱部材内の鉄筋、コンクリートの応力再配分が発生することになる。

図8は、約10年後の柱軸歪の高さ方向の分布を示した。コンクリートのヤング係数 F_c が高さ方向に変わるため、稲妻状の分布を示している。図9、図10は2階梁の曲げモーメント、せん断力分布例を示した。弾性解による結果

も示している。クリープ現象の発生により、弾性解に比べて、側柱側で増大している。量的には、地震荷重時のそれに比べると、曲げモーメント、せん断力の大きさは小さいと言える。

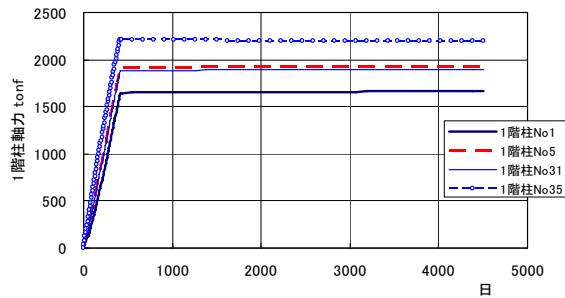


図4 1階柱軸力の時間変化

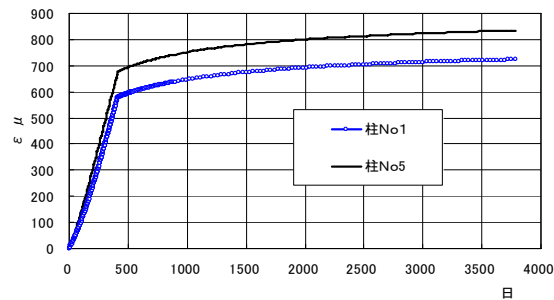


図5 1階柱軸歪の典型的な時間変化例

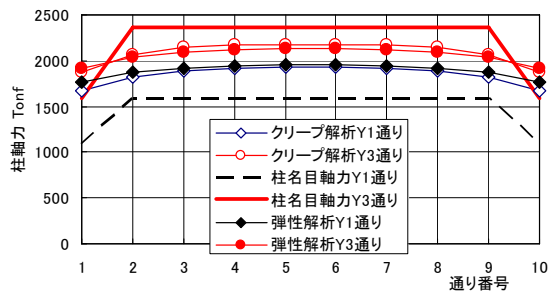


図6 1階柱の軸力分布例(約10年後)

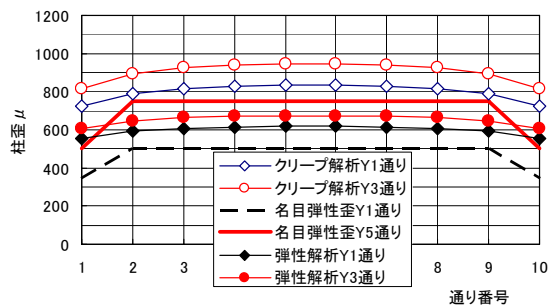


図7 1階柱の軸歪分布例(約10年後)

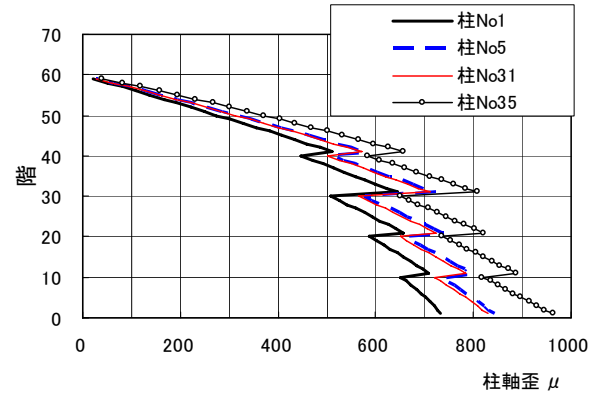


図8 約10年後の柱軸歪の高さ方向分布

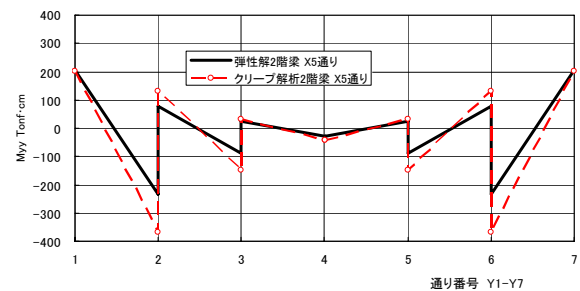


図9 約10年後の2階梁曲げモーメント

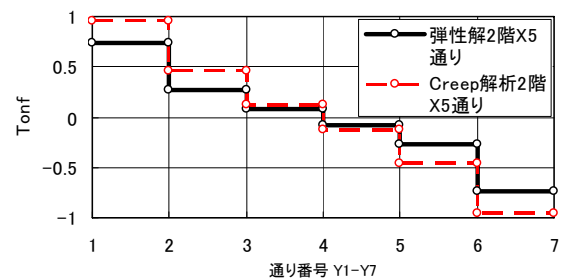


図10 約10年後の2階梁せん断力

§4. 簡易モデル

1 本柱に作用する軸力が段階的に増加し一定になる状況を考える。荷重変化は連続関数とみなせば、クリープ係数法的前提では、柱の任意時点での総歪(弾性+クリープ歪)が、EAを弾性軸剛性として次の(6)式の様に書ける。 $\phi(t)$ は時刻 t でのクリープ係数、 Δt は時間間隔である。

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \frac{P(t)}{EA} + \sum_j \frac{P_j}{EA_{\infty}} (\phi(t_j) - \phi(t_{j-1})) \\ &= \frac{P(t)}{EA} + \sum_j \frac{P_j}{EA} \frac{(\phi(t_j) - \phi(t_{j-1}))}{\Delta t} \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

ここで Δt を小さくすると上式は積分形で書ける。

$$\varepsilon(t) = \frac{P(t)}{EA} + \int_0^t \frac{P(\tau)}{EA} \frac{d\phi(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (7)$$

荷重増加パターンを図 11 右のようにモデル化して、上式に部分積分を施せば、結局、総歪として次式を得る。

ε_e は全荷重がかかった時の弾性歪である。

$$\varepsilon_t(t)/\varepsilon_e = \frac{t}{T_0} + \frac{t}{T_0} \phi_\infty (\tilde{\phi}(t) - \psi(t)) \quad (8)$$

ただし $t < T_0$

$$\varepsilon_t(t)/\varepsilon_e = 1 + \phi_\infty (\tilde{\phi}(t) - \psi(T_0)) \quad (9)$$

ただし $t > T_0$

$$\psi(t) \equiv \int_0^t \tilde{\phi}(\tau) d\tau / t \quad (10)$$

$$\tilde{\phi}(t) = \phi(t) / \phi_\infty \quad (11)$$

である。

$\phi(t)$ の表現として、(1) 式のような修正 CEB モデル式を想定すれば、 $\varepsilon_t(t)/\varepsilon_e$ は具体的に計算できる。 $\Psi(t)$ は“荷重が漸増する際の有効ないは平均的なクリープ係数増分に相当する”という意味がある。 $\Psi(t)$ は陽的には表現しづらいので β_H をパラメーターとしてグラフ化すると図 12 のようになる。 $\tilde{\phi}(t)$ は t が大きくなれば 1 に収束する量であり、 β_H をパラメーターとしてグラフ化すると図 13 のようになる。今回の解析対象について、約 10 年後の 1 階柱歪について総歪/弾性歪を計算 FEM 解と比較してみた。FEM 解が平均 1.39 (範囲 1.32~1.42) に対し、簡易解が 1.37 とほぼ一致した。ここで示した簡易的な評価でも概ね FEM 解と近い結果が得られることがわかる。

図 14 では 1 階柱歪の時間変化を FEM 解、簡易解で比較した。両者の一致は良い。なお、簡易解では ε_e として弾性 FEM 解を用いている。

前述の説明では 1 階柱を想定して説明したが途中階の柱でも時間原点をずらすことで全く同様に扱える。図 15 では、約 10 年後の各階柱軸歪の FEM 解、簡易解を比較した。両者の対応は概ね良い。

図 16 には、簡易解による約 10 年後の $\varepsilon_t(t)/\varepsilon_e$ の高さ方向の分布を示した。 $\varepsilon_t(t)/\varepsilon_e$ の値は 1 と $1 + \phi_\infty$ の中間にある。最上階でも $\varepsilon_t(t)/\varepsilon_e$ の値が $1 + \phi_\infty$ に一致しないのは (1) 式の表現でクリープ係数が収束するのに時間がかかるからである。

図 17, 18 では本例題建物(59 階)の 1 階柱について、立ち上がり速さ(日/層)、 β_H 、柱コンクリート強度： F_c の、約 10 年後の $\varepsilon_t(t)/\varepsilon_e$ に与える影響を簡易解で調べて図示した。各々の影響度合いが簡単に検討できる。

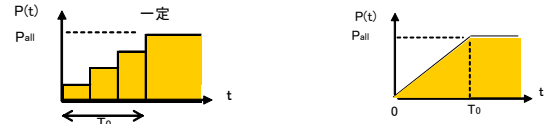


図 11 荷重過程の理想化 左：現実 右：理想化

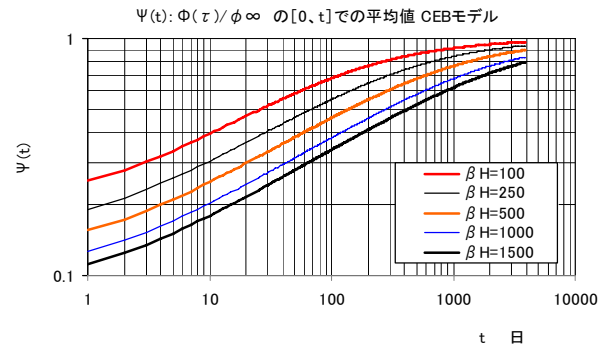


図 12 $\phi(t)$ ((10) 式) の様子

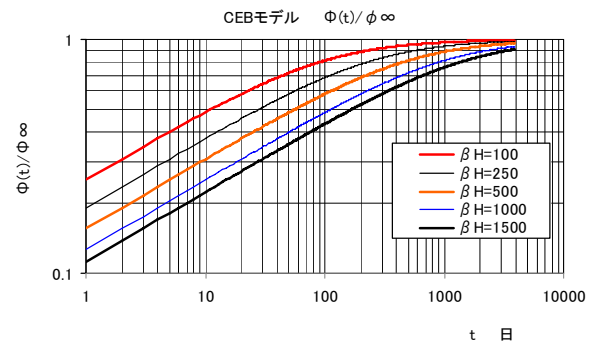


図 13 $\tilde{\phi}(t) = \phi(t) / \phi_\infty$ ((11) 式) の様子

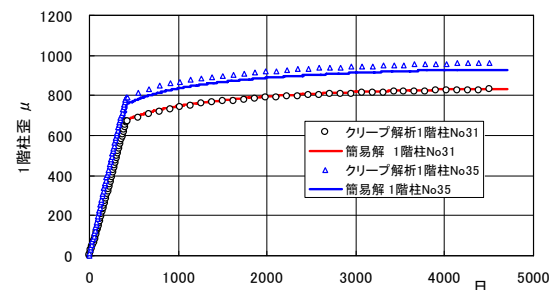


図 14 1 階柱軸歪の時間変化 FEM 解と簡易解比較

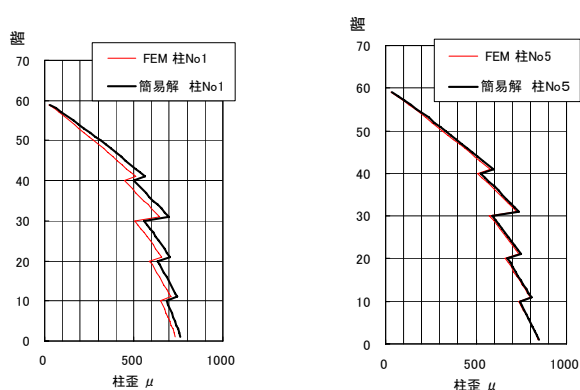
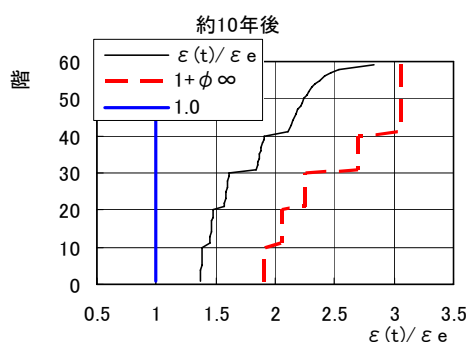
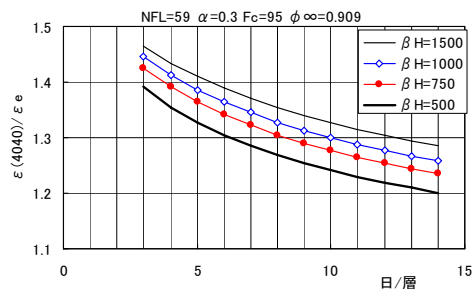
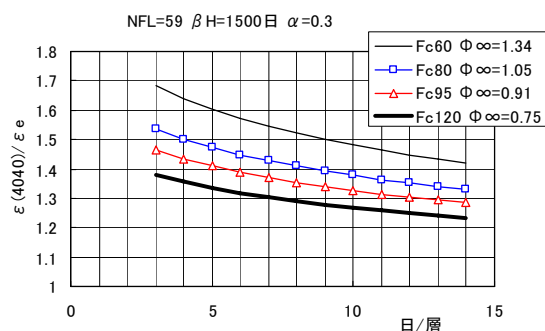


図 15 約 10 年後の柱歪分布 FEM 解と簡易解比較

図 16 約 10 年後柱軸歪 $\varepsilon_t(t)/\varepsilon_e$ 簡易解図 17 構築速さと β_H の約 10 年後の 1 階柱軸歪 $\varepsilon_t(t)/\varepsilon_e$ に与える影響 簡易解図 18 立構築速さ、Fc の約 10 年後の 1 階柱軸歪 $\varepsilon_t(t)/\varepsilon_e$ に与える影響 簡易解

§5. まとめ

クリープ係数法を用いた立体骨組の柱クリープ問題の FEM 解析手法を示した。59 階建 RC 構造について数値例を示し、柱軸力が均等化し特に隅柱で名目上軸力を 50% 程度上回ること、最終的に柱に生じる軸力は、弾性解析結果とほとんど変わらないことなど問題のオーダーが把握できた。また、柱に生じる歪評価の簡易的な定式化を示し、FEM 解とほぼ一致することを示した。これにより、問題に含まれる多くのパラメーターの影響を容易に調べられることを示した。解析結果の妥当性今後、実測で確認してゆく必要がある。

参考文献

- 1) 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, 建築学会構造系論文集, No.616, Jun., 2007 年
- 2) 今本啓一, 山本俊彦, 大岡督尚, 約 5 年間の実測データに基づくコンクリートのクリープ・収縮寸法効果の評価とクリープ予測方法の提案, 建築学会構造系論文集 No.593, Jul., 2005 年
- 3) 中山昌尚, 長大免震プレストレスト構造物のクリープ解析, AIJ 大会梗概(中国), 2008 年
- 4) 中山昌尚, 平面構造物のクリープ解析, 解析法と長大免震プレストレストプレキャストコンクリート構造物についての解析・計測結果比較, フジタ技術研究報告 44 号, 2008 年
- 5) 中山昌尚, 超高層 RC 構造物の柱クリープ解析 FEM 解積および簡易評価, 日本建築学会大会梗概(東北) No23379, 2008 年
- 6) Committee Euro-International du Beton: CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE), Thomas Telford, 1998



中山 昌尚

ひとこと

昨年の Ps 梁のクリープ問題(平面骨組)に続いて、柱のクリープ問題(立体骨組)を扱ってみました。単純化した例題とはいえ、マクロな扱いでもそこそこの結果が得られて新鮮な印象を持ちました。