

論文 FEM による超高強度鉄筋コンクリート柱に生じる自己収縮の予測と短期性能評価

堀川 真之*1・新藤 辰典*1・田嶋 和樹*2・白井 伸明*3

要旨: 超高強度コンクリートに生じる自己収縮やクリープが RC 構造物の破壊メカニズムに与える影響を把握し、耐久性性能評価を行うことを目的として、本報では 3 次元有限要素解析に基づく自己収縮ひずみの予測手法について検討を行った。自己収縮ひずみの予測に際しては、熱伝導解析を併用することによって温度依存性を考慮した。また、超高強度 RC 柱の短期解析を行い、自己収縮ひずみやクリープが柱の耐力および変形性能に及ぼす影響を確認し、それらが柱の破壊メカニズムに違いを生じさせる可能性があることが分かった。

キーワード: 超高強度鉄筋コンクリート柱, 自己収縮, 熱伝導解析, 3 次元 FEM, 短期性能評価

1. はじめに

我が国では、高強度材料の開発により鉄筋コンクリート (以下, RC) 造建物の高層化が進んでいる¹⁾。しかし、使用材料の性質や建物形状の影響から、自己収縮およびクリープの問題が指摘されている。このような背景から、自己収縮やクリープが RC 構造物の耐久性性能に与える影響の把握を目的とした実験的研究が近年多く報告されている。

本研究の最終目標は、コンクリートの収縮およびクリープに着目し、超高層 RC 造建物の耐久性性能を数値解析に基づいて予測することである。本研究の特徴は、コンクリートの時間依存挙動を比較的簡便な手法で予測し、そこから得られる初期条件が RC 構造物の破壊メカニズムに及ぼす影響の解明を試みる点である。研究の第一ステップとして、既報²⁾では、収縮・クリープを連成可能な解析モデルを構築し、超高強度 RC 柱の破壊メカニズムに与える影響を解析的に検証している。しかし、自己収縮ひずみに関する予測手法を確立しておらず、実験値を用いて自己収縮量を評価した経緯があり、自己収縮ひずみの予測手法の確立が課題であった。本報では、自己収縮ひずみの予測手法の確立を目指し、数値解析モデルを構築するとともに、丸山らの実験³⁾を対象として解析モデルの妥当性を検証する。さらに、仮想の超高強度 RC 柱を対象として、自己収縮ひずみやクリープが柱の耐力・変形性能に与える影響について検討する。

2. 自己収縮の予測と短期性能評価の概要

図-1 に本研究で行う数値解析のフローを示す。フローは、①コンクリートの自己収縮ひずみの評価、②コンクリートの自己収縮ひずみに伴う鉄筋応力の評価および

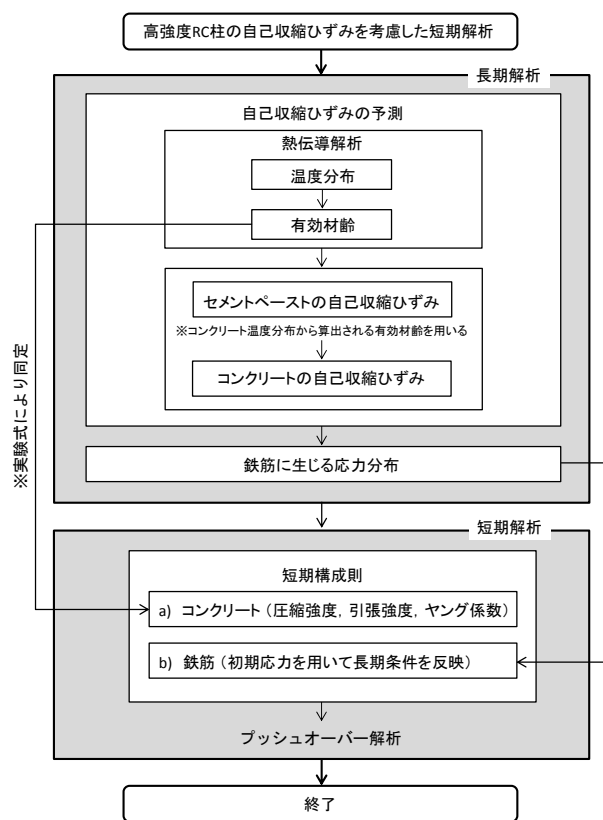


図-1 数値解析フロー

③短期性能評価 (耐力, 変形) の3段階に大別できる。長期解析では、コンクリートの自己収縮ひずみとそれに対応して生じる鉄筋の応力度を算出する。コンクリートの自己収縮ひずみは、コンクリートに作用する温度履歴に依存することが知られているため、熱伝導解析を実施して試験体内部に生じた温度履歴を予測し、寺本ら⁴⁾の予測式から温度履歴の影響を考慮したコンクリートの自己収縮ひずみを要素毎に算出する。続いて、コンクリ

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科助教 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

ートと完全付着を仮定した鉄筋に生じる応力度を算定する。一方、短期解析では、短期性能を確認する材齢における鉄筋の応力度を長期解析から求め、それを初期応力として短期解析モデルに入力することで長期条件を反映させる。なお、短期解析に用いるコンクリートの材料特性は、有効材齢を用いて、実験式から同定する。最後に、プッシュオーバー解析を実施し、柱の耐力・変形性能を確認する。

3. 自己収縮ひずみの予測手法

3.1. 解析対象試験体の概要

解析対象実験は、丸山ら³⁾によって行われた実大高強度RC柱の実験を対象とする。この実験の特徴は、超高強度RC柱内部の初期応力発生メカニズムを実験的に検証することを目的としており、特に自己収縮の温度依存性に着目した点である。そのため、自己収縮ひずみの予測に必要な材料特性および柱内部の温度履歴などの情報が不足なく掲載されている。図-2に試験体の概要を示す。本報では、夏期施工を想定し8月にコンクリートを打設したC-D41を解析対象とする。コンクリートの調合は、文献3の表-2に記載されているバッチB2である。試験体寸法は、900×900×1100の実大模擬柱であり、主筋にはD41(主筋比3.3%)、帯筋にはD13(帯筋比0.56%)を使用している。なお、文献では、鉄筋径のみの記載であるため、種別は不明である。型枠は、鋼製とし打設直後から材齢3日まではシート養生を行い、脱型後は実験室内に静置された。また、試験体各所の埋込型ひずみ計、鉄筋箱ゲージ及び熱電対によりひずみ及び温度履歴の計測を行っている。

3.2 熱伝導解析

図-3にFEM要素分割図を示す。汎用解析コードDIANA9.4.3を用いて、ガラーキン法に基づく有限要素解析を実施した。コンクリートには8節点ソリッド要素を用いた。また、4節点アイソパラメトリック四辺形要素を用いて、境界面上の熱伝達をモデル化した。鉄筋はトラス要素とし、完全付着を仮定した。境界条件は、一点をピンとし、回転を防止するため底面一辺を2方向拘束(青色部分)とした。反復手法は、標準Newton-Raphson法を採用し、収束条件として温度ノルム比を採用した。

表-1に解析に用いたパラメータを示す。熱伝導解析に必要な各種パラメータは、高強度コンクリートの調合および型枠種類などに依存する。そのため、本報では、コンクリートの水和発熱による断熱温度上昇曲線、熱伝導率、比熱、密度および型枠面の熱伝達率は、丸山ら⁵⁾と同様のものとした。特に、断熱温度上昇曲線の予測は、指針式を用いる方法が簡易的であるが、解析対象試験体に使用された高強度コンクリートは、指針式の適用範囲

を超える点およびシリカフェームを用いている点などで相違することから、本解析において用いることが難しい。したがって、丸山らの水和反応モデルCCBM⁶⁾に基づく予測値⁵⁾を用いた。水和反応モデルに基づく断熱温度上昇曲線の評価は今後の検討課題の一つである。なお、初期温度および外気温の変動は実験値を用いた。

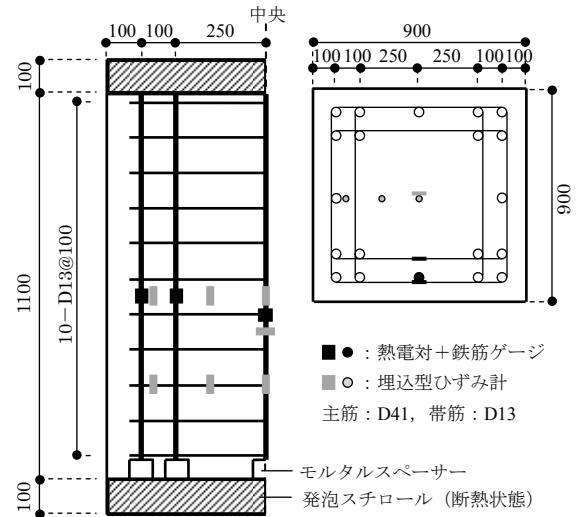


図-2 解析対象試験体³⁾

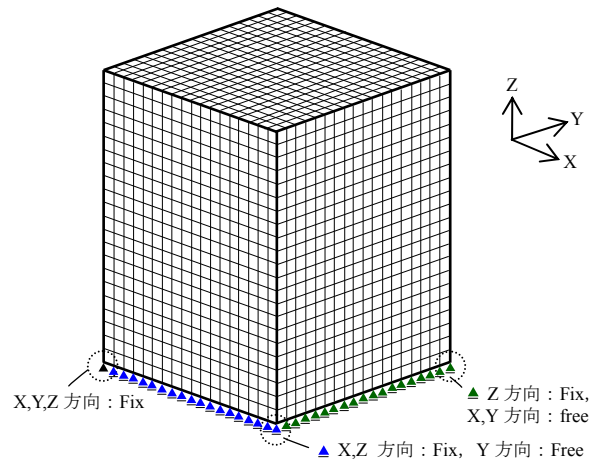


図-3 FEM要素分割図

表-1 解析パラメータ

解析パラメータ	使用値
コンクリート密度[g/cm ³]	2.3
比熱[J/g・K]	1.1
熱伝導率[W/m・K]	1.2
熱伝達率[w/m ² ・K]	6.5
初期温度[°C]	29.5
外気温度[°C]	実測値 ³⁾
断熱温度上昇曲線	丸山らのCCBM ⁶⁾ による予測 ⁵⁾

3.3 反応度 (Degree of Reaction)

水和熱により生成される熱生成量を計算するために、式(1)に示す反応度とよばれる変数 r を用いる。これは、

全熱生成量で瞬間的累積熱生成量を除した値に等しい。

$$r = \int_0^t qV \cdot hy(r, \tau) d\tau / \int_0^\infty qV \cdot hy(r, \tau) d\tau \quad (1)$$

ここで生成された熱量は温度履歴の関数である。瞬間的熱生成速度 q は、式(2)のように定義される。

$$qV \cdot hy(r, T) = \alpha \cdot q_r(r) \cdot q_T(T) \quad (2)$$

ここで、 r : 反応度($0 \leq r \leq 1$), T : 温度($^{\circ}\text{C}$), α : 熱生成速度の最大値, $q_r(r)$: 反応度依存型熱生成量, $q_T(T)$: 温度依存型熱生成量である。ここで、 $q_T(T)$ は、式(3)を用いる。

$$q_T(T) = e^{-\frac{C_A(r, T)}{T+273}} \quad (3)$$

ここで、 C_A : Arrhenius 定数である。熱伝導解析で入力される断熱温度上昇曲線から、式(2)を近似することで熱生成量を計算する。図-4 に反応度 r —熱生成速度 q の概念図を示す。この定式化では、初期の水和の進行を表現するために初期反応度が必要となる。これは、新たな r' - q' 軸を作成することで求められ、 $r = 0$ に対応する $r' = 0.1$ が初期反応度として定義される。DIANA は 0.1 をデフォルト値としているが、本研究では使用しているセメントの特殊性から実験値と整合するようにパラメトリックスタディを行い決定し、0.05 として解析を行った。

3.4 有効材齢の評価

熱伝導解析における熱生成量、また、後述する自己収縮ひずみを予測するため、有効材齢を計算する必要がある。本報では、式(4)に示す Arrhenius 型方程式により有効材齢を評価する。

$$t_e = \int_0^t \exp\left(C_A \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(\tau)}\right)\right) d\tau \quad (4)$$

ここで、 t_e : 有効材齢, C_A : Arrhenius 定数, T_{ref} : 基準温度(293[K]), $T(\tau)$: 試験体温度[K]である。本解析では、CEB モデルコードが推奨する 4000[K]とした。

3.5 自己収縮ひずみ予測式

寺本ら⁴⁾の予測式の特徴は、有効材齢を用いて任意の温度履歴条件下での自己収縮ひずみを予測できる点である。予測式の適用範囲と解析対象実験の適用範囲については、①低熱系セメントを用いている点、②シリカフェーム混入の結合材を用いている点、③水結合材比が 20% 以下である点などで類似していることから採用することとした。寺本らは、セメントペーストの自己収縮ひずみについて、自己収縮が進行する材齢をステージ 1、その後の材齢をステージ 2 として次式により提案している。ステージ 1 は、式(5)および(6)により表現される。

$$\varepsilon_{sh1,20} = -4400(W/B) + 1260 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{sh1} = \tau \cdot \varepsilon_{sh1,20} \quad (6)$$

ここで、 $\varepsilon_{sh1,20}$: 練上り温度が 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件時のステージ 1 の自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$), W/B : 水結合材比(-), ε_{sh1} : ステージ 1 の自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$), τ : 練上り温度の

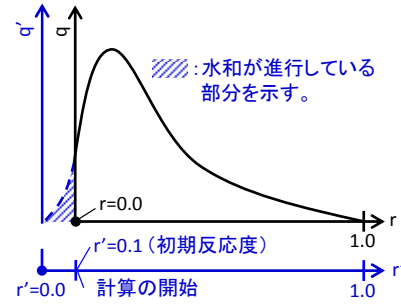


図-4 反応度 r —熱生成速度 q

影響を表す係数(10 $^{\circ}\text{C}$: 1.3, 20 $^{\circ}\text{C}$: 1.0, 30 $^{\circ}\text{C}$: 0.8)である。解析では、 $W/B=0.15$, $\tau=0.8$ とした。ステージ 2 は、式(7)で表現される。

$$\varepsilon_{sh2} = \varepsilon_{shmax,20} - \varepsilon_{sh1,20} \quad (7)$$

ここで、 $\varepsilon_{shmax,20}$: 練上り温度が 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件時の最大ひずみである。 $\varepsilon_{shmax,20}$ は、 $-1710(\times 10^{-6})$ と仮定される。以上を踏まえ、セメントペーストの各材齢における自己収縮ひずみを式(8)のように提案している。

$$\varepsilon_p(t_e) = \frac{-\varepsilon_{sh1}}{1+\exp(t_e-a)} - \varepsilon_{sh2} \cdot \exp\left(-\frac{t_e}{1000}\right) + \varepsilon_{shmax} \quad (8)$$

ここで、 $\varepsilon_p(t_e)$: 有効材齢 t_e におけるセメントペーストの自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$), a : 凝結に関する係数(時間), ε_{shmax} : ステージ 1 およびステージ 2 のひずみの合計である。本解析において、 a は、実験値に対応するように調節した。なお、本解析では、有効材齢を 3.6 節に示すコンクリートの温度履歴から算出した値を用いている。式(8)を用いて、式(9)~(12)により骨材量の影響を評価しコンクリートの自己収縮ひずみの予測式を提案している。

$$\Delta\varepsilon_c = \Delta\varepsilon_p(t_e) \frac{(1-V_a)(K_a/K_p+1)}{\{1+K_a/K_p+V_a(K_a/K_p-1)\}} \quad (9)$$

$$K_a = E_a/3(1-2v_a) \quad (10)$$

$$K_p = E_p/3(1-2v_p) \quad (11)$$

$$E_{p,28} = -17 \cdot \ln(W/B) + 4.5 \quad (12)$$

ここで、 ε_c : コンクリートの自己収縮ひずみ, V_a : 骨材体積比, K_a : 骨材の体積弾性係数(GPa), E_a : 骨材のヤング係数(GPa), K_p : セメントペーストの体積弾性係数(GPa), $E_{p,28}$: 材齢 28 日のセメントペーストのヤング係数(GPa), v_a : 骨材のポアソン比, v_p : セメントペーストのポアソン比である。解析では、 E_a , v_a , v_p は寺本ら⁴⁾と同様の値、 E_p は式(12)から算出し、 V_a は 0.5 とした。なお、予測式は、Arrhenius 定数を 10000[K]とした有効材齢により評価された経時変化する線膨張係数から温度ひずみを算出し、全ひずみから差し引くことで自己収縮ひずみを求めている。

3.6 解析結果

図-5 に Arrhenius 定数を 4000[K]とした場合の温度履歴の結果を示す。試験体中央部において、解析値は、72.8[$^{\circ}\text{C}$]となっており実験値を 2[$^{\circ}\text{C}$]程度下回った。また、

中央から 350mm 外側の部分では、解析の最大温度は、63.6[°C]となっており、実験値と同程度となった。温度上昇域および下降域において、若干実験値を下回る箇所が見受けられるが、全体挙動および位置による温度履歴の違いなど実験値と概ね良い対応を示しており、熱伝導解析の妥当性が確認できた。

図-6 に鉛直方向、図-7 に水平方向の断面内のひずみ分布図を示す。実験値は、全ひずみであるのに対し、実線は自己収縮ひずみ、一点鎖線は自己収縮ひずみ及び温度ひずみを足し合わせたものを記載した。なお、温度ひずみの算出は、線膨張係数を一定値である $10 \times 10^{-6}(/^{\circ}\text{C})$ とした。材齢 30 日までに自己収縮ひずみより主筋に生じたひずみは、約 700(μ)となっており、温度ひずみを考慮すると 50(μ)程度緩和されている。帯筋にも同様の傾向が見受けられる。温度ひずみを考慮することで、材齢 1 日前後での膨張傾向が捉えられており、全体的な傾向は実験値と良い対応を示している。一方で、本解析から得られる温度ひずみと予測式から計算される自己収縮ひずみは異なる線膨張係数で評価されているため、今後は、経時変化する線膨張係数の評価が課題である。

4. 自己収縮を考慮した RC 柱の短期解析

自己収縮ひずみと RC 柱の破壊性状に着目した実験的研究は少ない。また、このような視点に立った実験的研究であっても、温度履歴および自己収縮ひずみの予測に必要なセメント情報などが不足している場合が多く、数値解析結果と実験結果の比較が難しい。このような理由から、仮想の高強度 RC 柱試験体を用いた数値解析を実施する。仮想試験体のコンクリートの調合、物性、養生条件及び環境条件などは全て丸山らの実験³⁾と同様と仮定した。また、試験体形状および鉄筋の特性については、高森ら⁷⁾の実験を参考にした。

長期解析では、熱伝導解析を通じて RC 柱の温度履歴を予測し、断面内のコンクリートの自己収縮ひずみ分布を予測した。次に、実材齢 1400 日までに鉄筋に生じた応力状態を評価した。短期解析では、長期解析から得られた応力状態を初期応力として鉄筋の短期構成則へ入力することで初期状態を評価した。次に、定軸力(4050kN)を試験体上部に与えた後に変位制御により水平方向のプッシュオーバー解析を行った。図-8 に FEM 要素分割図を示す。試験体のスタブは、コンクリート構成則のヤング係数に対し 10 倍を設定した剛体を仮定した。コンクリートおよび熱伝達のモデル化に際しては前節と同様の要素を使用し、鉄筋は埋め込み鉄筋要素でモデル化した。

4.1 熱伝導解析結果

解析では、スタブを無視し RC 柱のみを対象に熱伝導

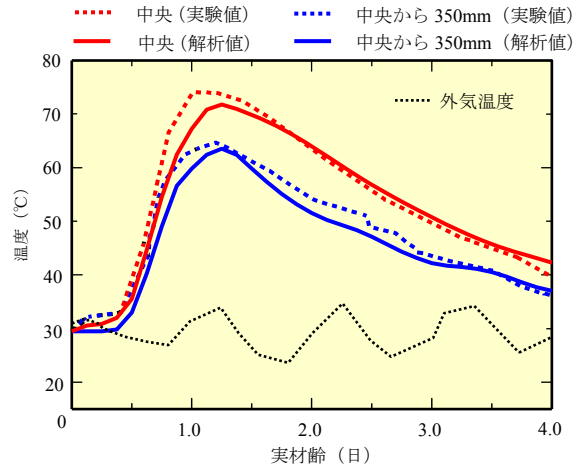


図-5 Arrhenius 定数 4000 [K] の場合の温度履歴

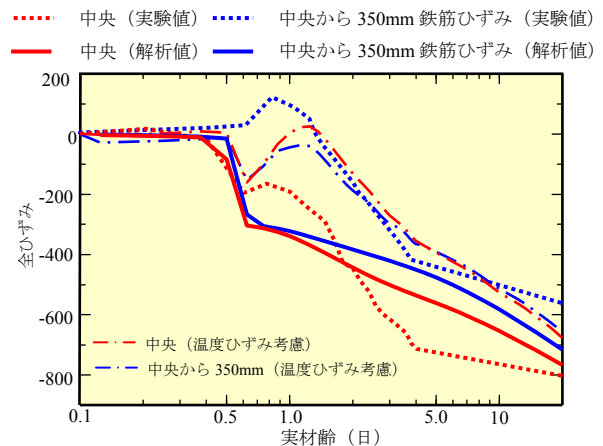


図-6 鉛直方向ひずみ分布

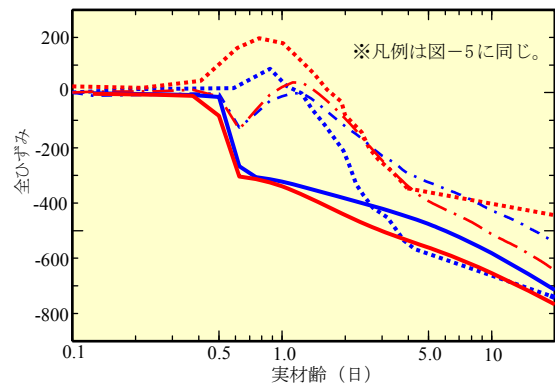


図-7 水平方向ひずみ分布

解析を実施した。図-9 に高さ中央における断面内の温度履歴を示す。節点温度については、柱中央付近において、最大で 51°C、中央から 60mm 外側では最大 49.5°C、120mm 外側では最大 45.3°C となっており、断面中心部から側面へ向かうにつれて温度上昇が鈍くなる傾向がとらえられている。図-10 に柱内部の温度分布図を示す。分布図からも分かるように、高さ中央断面と柱頭断面に生じた温度分布は同傾向であり、高さ方向に温度のばらつきが殆ど生じていない。

4.2 短期性能評価

材齢 1400 日のコンクリートの材料特性は、次式⁵⁾により決定した。

$$f_c(t) = 150 \exp\left(0.25(1 - (28/(t - 0.4))^{0.5})\right) \quad (13)$$

$$E_c(t) = 6.0 \cdot f_c(t)^{0.44} \quad (14)$$

$$f_t(t) = 0.13 \cdot f_c(t)^{0.8} \quad (15)$$

ここで、 t : 有効材齢, $f_c(t)$: 圧縮強度(MPa), $E_c(t)$: コンクリートのヤング係数(GPa), $f_t(t)$: コンクリートの引張強度 (割裂引張強度) (MPa)である。有効材齢を算出したところ、実材齢 1400 日における有効材齢は、空間的に一様であり、1750 日であった。この結果、ヤング係数 : 5.98×10^4 (MPa), 圧縮強度 : 186(MPa), 割裂引張強度 : 8.52(MPa)となった。

図-11 に構成則を示す。圧縮側は Parabolic で表現し、下降域で囲まれる面積は、圧縮破壊エネルギー G_{fc} を要素代表長さ L_c で除した値である。 G_{fc} は中村らの提案式⁸⁾より求めた。引張側は下降域に大岡ら⁹⁾の 3 直線モデルを用い、下降域で囲まれる面積は、引張破壊エネルギー G_f を要素代表長さ L_c で除した値である。 G_f は大岡らの提案式⁹⁾より求めた。要素代表長さ L_c は、要素体積 V と等価な体積をもつ球の直径 ($L_c = 2(3V/4\pi)^{1/3}$)とした。鉄筋の応力-ひずみ関係は、bi-linear 型モデルとし、降伏後の 2 次剛性は初期剛性の 1/100 とした。拘束効果については、Mander らの手法を用い圧縮破壊エネルギーのみ上昇させている。非線形反復解析法は、標準 Newton-Raphson 法を採用した。

図-12 に初期応力を考慮しない場合の解析結果を示す。図中には、参考のため高森らの実験結果も合わせて示す。実験時の材料特性は、ヤング係数 : 4.70×10^4 (MPa), 圧縮強度 : 177(MPa), 割裂引張強度 : 7.70(MPa)でありコンクリートの材料特性が異なる点及び実験の正負交番繰返し水平荷重に対してプッシュオーバー解析を実施した点で直接的に比較ができないが、全体挙動に対して概ね実験値と同等の傾向を示していると考えられる。したがって、図-12 の結果を基本モデルとして検討を行う。図には、破壊過程の各現象をシンボルとして表示している。耐力が急激に低下する各点では、縦ひび割れ、圧縮鉄筋の降伏に伴うコンクリートの圧壊が生じている。なお、圧壊を圧縮側構成則の終局ひずみとして定義した。

図-13 に自己収縮を考慮した解析結果を示す。基本モデルと比較すると、全体挙動について、耐力が低下し変形性能が増加する傾向がある。曲げひび割れ、縦ひび割れおよび主筋圧縮降伏開始は、同程度の部材角で生じるが、対応するせん断力は低い。主筋の圧縮降伏が開始した直後に圧壊が起きておきている点では、基本モデルと同様の傾向であった。

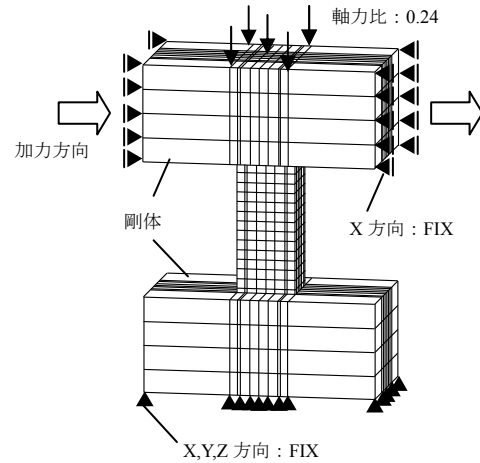


図-8 FEM 要素分割図

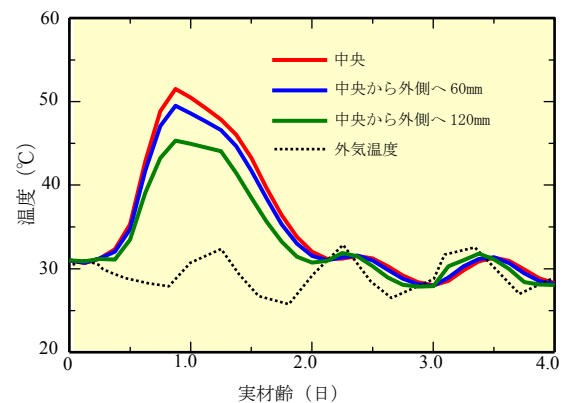


図-9 高さ中央における断面内温度履歴

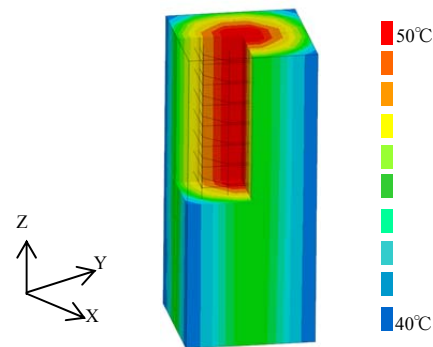


図-10 柱内部の温度分布図

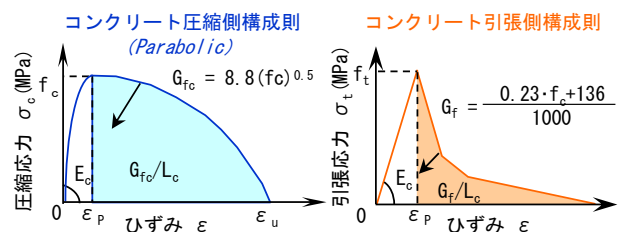


図-11 コンクリート構成則

図-14 に自己収縮および実材齢 28 日目から軸力によるクリープを考慮した解析結果を示す。なお、若材齢時のクリープは考慮せず、軸力に起因するクリープについては、CEB-FIP MODEL CODE 1990 から求めたクリープ

曲線に適合するように KELVIN チェーンモデルのパラメータを同定しモデル化した。解析結果は、自己収縮に加えクリープにより主筋に相当の圧縮応力が生じているため、主筋の圧縮降伏が開始する部材角が非常に早い。これにより、初期勾配が低下しているものと考えられる。しかし、急激にコンクリートが軟化する現象は生じず、**図-13**と同程度の部材角で縦ひび割れが発生する。圧壊時の部材角も同程度であった。全体挙動は、自己収縮ひずみを考慮したものと概ね同程度となったが、破壊過程に差が見受けられる結果となった。

5 まとめ

- 1) 熱伝導解析を用いて求めた RC 柱断面内の温度履歴から、自己収縮ひずみを予測する手法を構築できた。
- 2) 自己収縮・クリープによって鉄筋に生じた応力状態を初期応力として与えることで、RC 柱の破壊過程に違いが生じ耐力が低下する可能性がある。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究(C) 代表者：白井伸明）の助成を受けて行われたものである。また、研究の遂行にあたり、各種論文データを参考にさせていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会：高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会報告集,2006.7
- 2) 堀川真之, 田嶋和樹, 白井伸明：収縮・クリープを考慮した超高強度鉄筋コンクリート柱の短期水平挙動の FEM 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2,pp.73-78,2011.7
- 3) 丸山一平, 鈴木雅博, 中瀬博一, 佐藤良一：温度履歴が RC 柱の初期応力・初期欠陥に及ぼす影響に関する実験的検討—超高強度コンクリートを用いた RC 柱の初期応力・初期欠陥に関する研究 その 1—, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 629 号, pp.1035-1042,2008 年 7 月
- 4) 寺本篤史, 丸山一平, 谷村充, 三谷裕二：超高強度コンクリートの自己収縮予測式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 654 号, pp.1421-1430, 2010 年 8 月
- 5) 丸山一平, 鈴木雅博, 勅使川原正臣, 佐藤良一：超高強度コンクリート柱の断面内応力に関する解析的検討—超高強度コンクリートを用いた RC 柱の初期応力・初期欠陥に関する研究 その 2—, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 637 号, pp.425-1042,2009 年 3 月

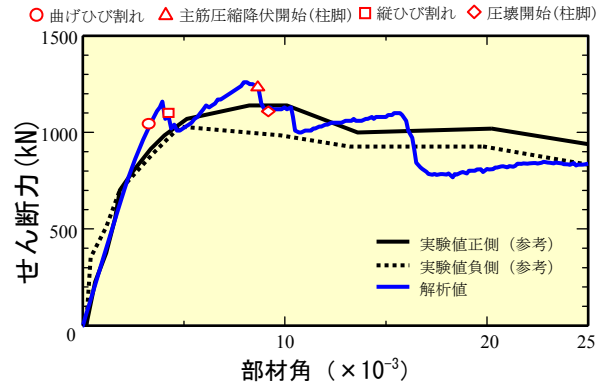


図-12 初期応力を考慮しない場合

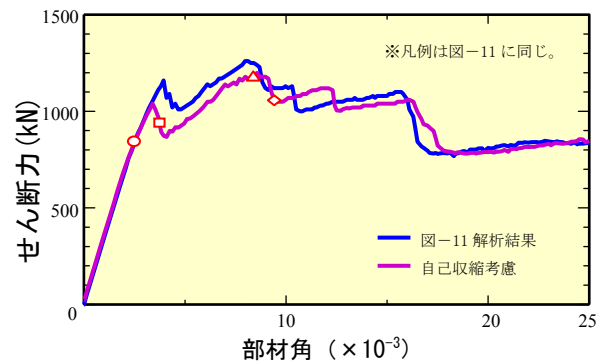


図-13 自己収縮を考慮した場合

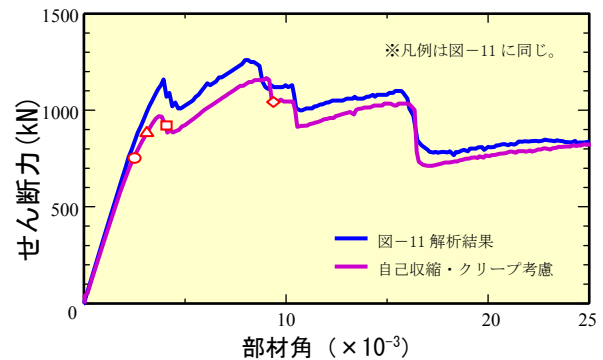


図-14 自己収縮・クリープを考慮した場合

- 6) 丸山一平, 野口貴文, 松下哲郎：ポルトランドセメントの水和反応モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 593 号, pp.1-8, 2005.7
- 7) 高森直樹ほか：超高強度材料を用いた RC 造柱の耐震性能に及ぼす長期性状の影響（その 1）RC 造柱の収縮および圧縮クリープ特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集,2009.8
- 8) Nakamura, H., and Higai, T.:Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Intelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 1990. 10
- 9) 大岡督尚ほか：コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 529 号, 99.1-6. 2000.3