

論文 3次元 FEM による若材齢挙動に起因する初期応力を考慮した高強度 RC 柱の短期水平荷重解析

堀川 真之^{*1}・渡邊 湊^{*2}・田嶋 和樹^{*3}・白井 伸明^{*4}

要旨：高強度コンクリートの時間依存挙動を考慮した高層 RC 造建物の耐震性能評価手法の構築を目的として、①若材齢挙動のモデル化、②初期応力を考慮した短期解析について検討を行った。3次元 FEM を用いた若材齢挙動のモデル化では、力学的特性として経時変化する線膨張係数と弾性係数を考慮した。続いて、コンクリートと鉄筋に生じた初期応力を短期解析モデルに導入し破壊過程の考察を行った。その結果、縦ひび割れ発生時および鉄筋の圧縮降伏に伴う耐力の低下は、自己収縮ひずみの経時変化に伴った若材齢コンクリートに生じる引張応力の分布と主筋に累積される圧縮応力に起因していることが分かった。

キーワード：高強度 RC 柱, 若材齢挙動, 応力・クリープ解析, 初期応力, 短期水平荷重解析, 3次元 FEM

1. はじめに

我が国では、鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物の高層化に伴い、下層階柱に高軸力が作用することでクリープ変形が顕著になることが問題視されている^{1), 2)}。しかし、外乱に対する部材や建物の応答に主眼を置いてコンクリートの経時変化による影響を実験的に把握することは時間的制約等から難しい。そのため、数値解析を通じて問題点を抽出し、実験的に確認すべき事柄を整理することが重要である。筆者らは、約4年間軸力によりクリープが進行したRC柱について短期性能をFEM解析に基づいて検討し、鉄筋が早期圧縮降伏することを指摘した³⁾。しかし、高強度コンクリート内部に生じる初期応力も無視できず、その要因の1つである自己収縮ひずみや温度ひずみに着目し、既往の予測モデルの適用性についても検討した⁴⁾。

本報では、初めに経時変化するコンクリートの力学的特性および若材齢クリープを考慮した初期応力の評価手法を構築する。コンクリートの種々の力学的特性は、若材齢時に大きく変化するが、今回は温度ひずみに関係する線膨張係数と初期応力の評価に影響を及ぼす弾性係数の経時変化を考慮する。若材齢時のクリープひずみは、計算コストと精度を両立するために de Bosrt & van Den Boogaard⁵⁾の手法を用いて Bazant & Osman⁶⁾の二重べき乗則 (Double power law) に基づきモデル化する。初期応力は、最終的に自己および乾燥収縮ひずみと温度ひずみに加え、若材齢クリープひずみも考慮した応力解析により評価する。また、短期解析への初期応力の導入に際しては、鉄筋のみならずコンクリートにも導入を試み、若材齢時の挙動に起因する初期応力が高強度 RC 柱の短期挙動に与える影響について考察を行う。

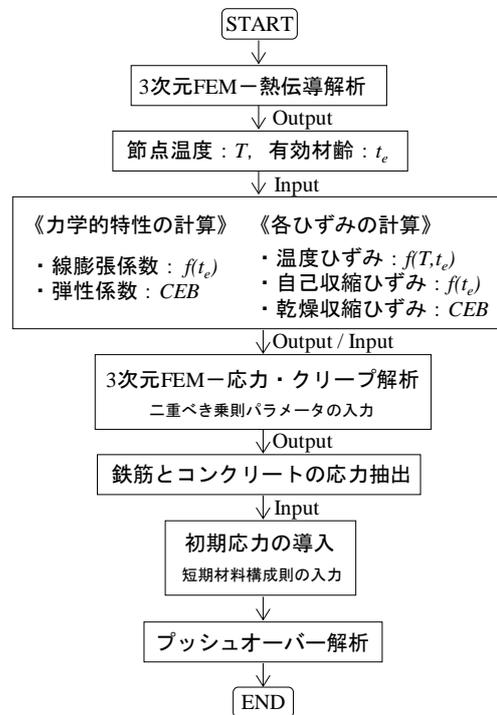


図-1 数値解析フロー

2. 数値解析フロー

図-1に数値解析フローを示す。3次元 FEM による熱伝導解析を実施し節点温度および有効材齢を算出する。続いて、力学的特性として経時変化する線膨張係数および弾性係数を有効材齢から算出する。また、線膨張係数と節点温度から温度ひずみ、有効材齢から自己収縮ひずみを要素毎に算出する。乾燥収縮の予測は熱伝導解析の結果を必要としない。応力・クリープ解析は、各種ひずみ、力学的特性および二重べき乗則パラメータが要素毎に入力されることで計算される。続いて鉄筋とコンクリ

*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

*3 日本大学 理工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

*4 日本大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

ートに生じる応力を各々抽出し、短期構成則へ要素毎に初期応力として与え自己釣合状態を算出する。最後にブッシュオーバー解析を実施し破壊メカニズムの考察を行う。なお、解析には汎用解析コード DIANA⁷⁾を使用する。

3. コンクリートの力学的特性とひずみの算出方法

(1) 経時変化する線膨張係数と弾性係数

線膨張係数は、寺本らの⁸⁾提案式により算出する。

$$\{\Delta\varepsilon_t\} = \frac{\alpha_t - \alpha_{t-1}}{2} \cdot (T_t - T_{t-1}) \quad (1)$$

ここで、 t : コンクリート材齢、 $\Delta\varepsilon_t$: 時刻 t における増分温度ひずみ[-]、 α_t : 時刻 t における線膨張係数[$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]($1^{\circ}\text{C}=273[\text{K}]$)、 T_t : 時刻 t における試験体温度[$^{\circ}\text{C}$]である。

応力解析では、弾性係数を次式⁹⁾により算出する。

$$E_C(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} E_{c28} \quad (2)$$

ここで、 E_{c28} : 材齢 28 日におけるヤング係数、 $\beta_{cc}(t)$: 時間依存係数であり次式により求められる。

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_e}}\right)\right] \quad (3)$$

s : セメント種類に依存する係数、 t_e : 有効材齢である。

(2) 温度ひずみ

次式⁸⁾からコンクリートの線膨張係数を算出する。

$$\alpha_c(V_a) = \frac{1}{\frac{1-V_a}{\alpha_p(t_e)} + \frac{V_a}{\alpha_a}} \quad (4)$$

ここで、 V_a : 骨材体積比、 $\alpha_c(V_a)$: 骨材体積比 V_a のコンクリートの線膨張係数[$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]、 α_a : 骨材の線膨張係数[$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]である。 $\alpha_p(t_e)$ は、有効材齢 t_e におけるセメントペーストの線膨張係数[$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]であり次式により与えられる。

$$\alpha_p(t_e) = \frac{110}{t_e} + 0.5 \cdot \exp\left(1 - \frac{1}{0.02 \cdot t_e}\right) + 1 \quad (5)$$

(3) クリープひずみ

弾性ひずみとクリープひずみは、次式により算出する。

$$\{\varepsilon_e\} + \{\varepsilon_{cr}\} = \int_0^t J(t, \tau) \mathbf{C} \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (6)$$

ここで、 $J(t, \tau)$: クリープ関数、 $\dot{\sigma}$: 応力速度テンソルである。 \mathbf{C} は、コンプライアンスであり、ひずみの各成分がポアソン比の関数として次式で定義される。なお、太字はマトリクスを意味している。

$$C_{ijkl} = \frac{1}{2}(1 + \nu)(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) - \nu\delta_{ij}\delta_{kl} \quad (7)$$

ここで、 ν : 荷重作用時間には依存しないと仮定したポアソン比、 δ_{ij} 、 δ_{kl} : クロネッカーデルタ($i, j, k, l = x, y, z$)である。クリープ関数には次式の二重べき乗則⁵⁾を用いる。

$$J(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} [1 + q\tau^{-d}(t - \tau)^p] \quad (8)$$

ここで、 τ : 載荷材齢、 t : 任意材齢、 $E(\tau)$: 載荷時のヤング係数である。全履歴の保存を回避するため、式(8)の $f(t) = (t - \tau)^p$ は、 $t - \tau = td$ まわりに Taylor 展開される。なお、本報では、第 5 項までを採用した。 q, d, p は、クリープを記述する材料パラメータである。

これらの定式化を変位法に基づく有限要素に組み込むために、応力増分がひずみ増分および応力履歴の関数となるように整理する。応力は、時間増分にわたり線形変化($\dot{\sigma} \approx \Delta\sigma/\Delta t$)すると仮定し、一般化中点則($t_i \leq t^* \leq t_{i+1}$)を利用すると次式で表現される。

$$\{\Delta\sigma\} = \bar{E}(t^*) \mathbf{D} \{\Delta\varepsilon\} + \{\tilde{\sigma}(t)\} \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{D} : \mathbf{C} の逆行列である。ただし、 $\bar{E}(t^*)$ は、式(6)が考慮された等価剛性を表しており、次式で表現される。

$$\frac{1}{\bar{E}(t^*)} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} J(t + \Delta t, \tau) d\tau \quad (10)$$

また、 $\{\tilde{\sigma}(t)\}$ は、次式となる。

$$\{\tilde{\sigma}(t)\} = -\bar{E}(t^*) \int_0^t (J(t + \Delta t, \tau) - J(t, \tau)) \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (11)$$

(4) 自己収縮ひずみ

本報では、温度依存性を考慮するため次式に示す寺本ら⁸⁾の予測式を採用する。

$$\{\Delta\varepsilon_{as}\} = \{\Delta\varepsilon_p\} \frac{(1-V_a)(K_a/K_p+1)}{\{1+K_a/K_p+V_a(K_a/K_p-1)\}} \quad (12)$$

ここで、 $\{\Delta\varepsilon_{as}\}$: 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]、 K_p : セメントペーストの体積弾性係数[GPa]である。また、 $\{\varepsilon_p\}$ は次式により与えられる。

$$\{\varepsilon_p\} = \frac{-\{\varepsilon_{sh1}\}}{1 + \exp(t_e - a)} - \{\varepsilon_{sh2}\} \cdot \exp\left(-\frac{t_e}{1000}\right) + \{\varepsilon_{shmax}\} \quad (13)$$

$\{\varepsilon_p\}$: 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[$\times 10^{-6}$]、 ε_{sh1} 、 ε_{sh2} : ステージ 1 およびステージ 2 における自己収縮ひずみ[$\times 10^{-6}$]、 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。 a は、混和割合によって決まる係数であり、収縮開始材齢を考慮するものである。 ε_{sh1} は、次式により与えられる。

$$\{\varepsilon_{sh1}\} = \tau \cdot \{-4400(W/B) + 1260\} \quad (14)$$

ここで、 W/B : 水結合材比、 τ : 練上り温度を表す係数である。 ε_{sh2} 、 ε_{shmax} 、 K_a 、 K_p の詳細については文献 8 を参照されたい。

(5) 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみは、次式⁹⁾により算出する。

$$\{\varepsilon_{ds}\} = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_S(t - t_S) \quad (15)$$

ここで、 ε_{cs0} : 収縮係数、 β_S : 時間に伴う収縮の発達を記述する係数、 t : コンクリート材齢、 t_S : 収縮の開始時におけるコンクリート材齢である。なお、 ε_{cs0} および β_S の詳細については文献 9 を参照されたい。

表－1 解析パラメータの整理

熱伝導解析		力学的特性・各ひずみの予測		短期材料特性(材齢1443日目)		
比熱 [J/g°C]	1.0	自己収縮ひずみ 線膨張係数	骨材体積比 V_a [-]	0.5	コンクリート	
熱伝導率 [W/m°C]	1.5		骨材の体積弾性係数 K_a [GPa]	39.8	ヤング係数 [GPa]	47.0
熱伝達率 [W/m²°C]	鋼製型枠		セメントペーストの体積弾性係数 K_p [GPa]	17.1	圧縮強度 [MPa]	177
	コンクリート表面		水結合材比 W/B [-]	0.19	引張強度 [MPa]	7.7
	柱上下面(断熱)		練上り温度を表す係数 τ [-]	0.8	ポアソン比 [-]	0.22
密度 [kg/m³]	2.52		凝結に関する係数 a [時間]	17	密度 [kg/m³]	2300
断熱温度 上昇曲線	a		骨材の線膨張係数 α_a [$\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$]	7.6	鉄筋	
	c		ϵ_{cs0}	1.0E-4	密度 [kg/m³]	7.85E+3
	Q		$\beta_s(t-t_s) = \frac{(t-t_s)/t_1}{350(150/100)^2 + (t-t_s)/t_1}$		ポアソン比 [-]	0.3
	γ				ヤング係数 [GPa]	199(D16)
初期温度 [°C]	30	クリープひずみ	二重べき乗則パラメータ q, d, p	3.0, 0.35, 0.3	降伏強度 [MPa]	739.7(D16)
外気温度 [°C]	28	弾性係数	セメント種類に依存する係数 [-]	0.38	ヤング係数 [GPa]	210(U6.4)
アレニウス定数 C_A	4000		材齢28日のヤング係数 E_{28} [GPa]	43.2	降伏強度 [MPa]	1374(U6.4)

(6) 有効材齢

有効材齢は、次式により求められる。

$$t_e = \int_0^t \exp\left(C_A \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(\tau)}\right)\right) d\tau \quad (16)$$

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。

4.解析対象試験体概要と解析パラメータの整理

解析対象試験体には、若材齢挙動と短期挙動の情報が必要となる。このことから、本報では高森ら¹⁾の実験を対象とする。本実験では高強度 RC 柱に生じる収縮・クリープ挙動の把握および耐震性能に及ぼす影響について破壊過程に着目した考察も行われている。

試験体は、図－1 に示す実大 1/3～1/4 の模型試験体である。脱型は材齢 8 日目に行われ実験室内に放置され、材齢 1443 日目に曲げせん断実験が実施された。

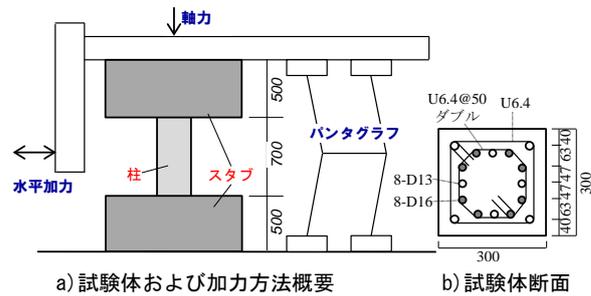
表－1 に解析パラメータ一覧を示す。着色部分が本実験で取得された材料特性でありその他のパラメータは仮定した。このように、既往の研究においては、本解析に必要な情報が不足している場合が多く、解析パラメータを仮定する手法の確立とその妥当性の検証も重要である。

(1) 熱伝導解析パラメータ

比熱・熱伝導率は、定数として扱うことが多い¹⁰⁾ことから、指針式¹¹⁾の下限値を設定した。鋼製型枠を仮定し指針式¹¹⁾の値を採用し、脱型後の露出面は杉山ら¹²⁾の研究を参考にした。断熱温度上昇曲線は、①シリカフェームが使用された点、②最大骨材径が 20mm である点、③ 28 日の圧縮強度が同等である点から、次式¹³⁾を採用した。

$$Q(t) = \frac{1}{1+a \cdot e^{bt}} \cdot Q_\infty (1 - e^{-\gamma t}) \quad (17)$$

ここで、 $Q(t)$: 時間 t (day) の断熱温度上昇量[°C], Q_∞ : 終局断熱温度上昇量[°C], γ : 発熱開始から発熱終結期に至るまでの温度上昇速度に関する係数, a : 発熱加速期の温度上昇速度に関する係数, b : 発熱開始から発熱加



図－1 解析対象試験体概要

速期に至るまでの時間に関する係数である。本式は夏期に打設され、水結合材比 (W/B) : 0.19 の低熱ポルトランドセメントを対象にしているため自己収縮の同定作業において共通事項とする。Arrhenius 定数の値は、既報⁴⁾においてその適用性を確認していることから 4000 とした。

(2) 力学的特性・各ひずみの予測パラメータ

自己収縮ひずみおよび線膨張係数の予測に必要な V_a , K_a , K_p および α_a は、文献 8 を参考に決定した。 a は、既報⁴⁾をパラメトリックに検証した結果を踏まえ 17 とした。二重べき乗則パラメータは、de Bosrt & van Den Boogaard⁵⁾の検討結果に準じ決定した。また、弾性係数の予測に必要なセメント種類に依存する係数は遅延硬化セメントを採用することで整合をはかった。

(3) 短期解析に用いる材料特性

鉄筋とコンクリートの構成則に必要な一軸強度特性は実験的に取得されているため同様の値を用いた。なお、密度および鉄筋のポアソン比は仮定値を用いている。

5. 熱伝導解析とひずみの算出結果

(1) 要素分割と境界条件

図－2 に要素分割図と境界条件を示す。温度解析では、柱部分のみを対象とした。コンクリートは 8 節点ソリッド要素を用いた。また、4 節点四辺形要素を用いて外気との熱伝達をモデル化した。なお、スタブとの境界面は断熱境界を仮定し熱伝達率を 0 としている。

(2) 解析結果

図-3 に温度履歴、断熱温度上昇曲線およびコンター図を示す。断熱上昇曲線は、90[°C]まで上昇するが、試験体断面は 300×300[mm²]と小さいため中心の温度は、最大で 47.3[°C]までしか上昇しない。ピーク温度時の様子をコンター図に示した。温度分布が同心円状であることから、結果は概ね妥当であると考えられるが、実験結果が不明なため仮定した熱特性値が妥当であるかは判断できない。応力解析に入力する自由ひずみの結果を図-4 に示す。材齢 0.5 日以前では、温度上昇に伴う膨張ひずみが生じるが、自己収縮ひずみにより材齢 1 日前後から圧縮ひずみが卓越する。乾燥収縮ひずみは、脱型後 8 日から生じるものの比較して小さい。しがたって、予測結果は、自己収縮ひずみが大部分を占めることとなった。

6. 応力・クリーブ解析

(1) 解析条件

図-5 に応力解析の要素分割図と境界条件を示す。スタブは弾性体とし、柱部分のみを応力解析の対象とする。コンクリートには 8 節点ソリッド要素、鉄筋は埋め込み鉄筋要素とした。境界条件は、下スタブの底面を全面ピンとした。自重は、材齢 0.25 日目(有効材齢 0.32 日目)より作用させ、ポアソン比は 28 日の実験値を一定に与えた。なお、型枠のモデル化は行っていない。解の安定性を得るために、釣合反復手法として初期剛性法を採用した。

(2) 解析結果

図-6 に中央要素の全ひずみの経時変化を示す。供試体の膨張ひずみを過小評価した原因は、仮定した熱伝導解析パラメータの影響により温度上昇量を過小評価したためであると推察される。また、ひずみ履歴の違いは、式(13)第 1 項において表現される若材齢時の自己収縮を過小評価したことが原因と考えられる。よって、有効材齢の予測結果について検証が必要であり、とりわけ、断熱温度上昇曲線や熱伝達率の設定方法に改善が必要であると考えている。その他パラメータの仮定方法に改善が必要な部分も考えられるが、有効材齢 5 日程度にひずみ速度の勾配が変化する傾向や有効材齢 40 日目に生じた水平方向の値は比較的良い対応を示している。

図-7 に実材齢 1443 日目におけるコンクリートの最大主応力分布と鉄筋の材軸方向応力分布を示す。実験より同材齢の割裂引張強度は 7.7[MPa]である。柱頭柱脚はスタブによる拘束から引張強度を超えている。かぶりコンクリートには約 3.0 [MPa]が生じ、コアコンクリートは約 4.0[MPa]の引張応力状態に達している。対応するように鉄筋には、-60~-150[MPa]程度の圧縮応力が累積されている。このような鉄筋とスタブによる拘束に起因した引張応力の分布と主筋に累積される圧縮応力の分布は、柱

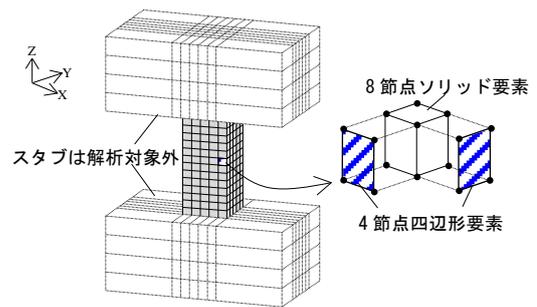


図-2 要素分割および境界条件

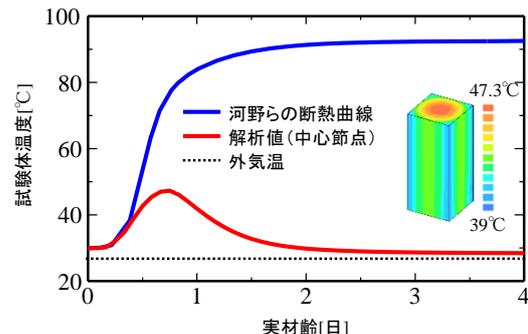


図-3 温度履歴、断熱曲線およびコンター図

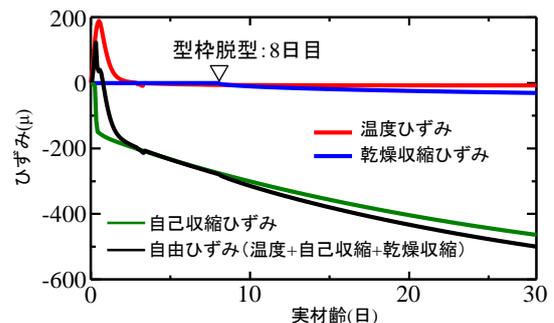


図-4 応力解析に入力する自由ひずみの予測結果

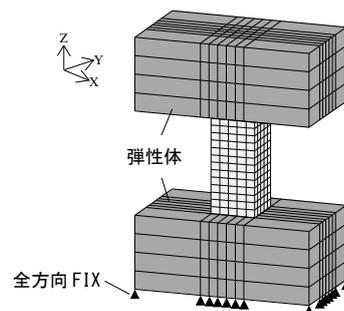


図-5 応力解析の要素分割図と境界条件

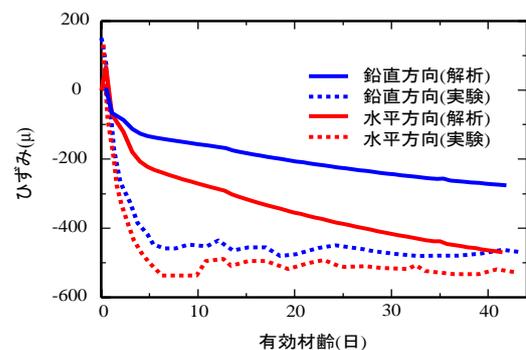


図-6 中央要素における全ひずみの変化

の破壊過程に影響を及ぼすものと考えられる。

7. 初期応力導入および短期解析の考察

(1) 解析条件

図-8 に短期解析に用いる要素分割図, 境界条件および短期構成則を示す。本報では回転ひび割れモデルを採用し等価せん断剛性を評価している。境界条件は, スタブ下面をピン, 上スタブ側面をZ方向をローラーとし加力は変位制御とした。釣合反復手法として標準 Newton-Raphson 法を採用した。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¹⁴⁾より求めた。引張側は下降域に大岡ら¹⁵⁾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¹⁵⁾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, Mander¹⁶⁾らの手法を用い圧縮破壊エネルギーを20倍上昇させている。

(2) 初期応力導入の確認

図-9 に初期応力の導入結果を示す。ここでは, コンクリートの材料特性を弾性体としたものと図-8の構成則とした場合(以下, 非線形モデル)について比較検討する。弾性体とした場合は, スタブとの取り合い部分や高さ中央に分布する引張応力について図-7に示した状態を概ね模擬しており連成手法の妥当性が確認できる。一方で, 非線形モデルとした場合, スタブを除いた柱部分に生じる引張応力は均一に分布しており, 引張応力が解放されたことでスタブ近傍の応力が低下しているようである。柱要素に生じた応力は, 分布に違いが見られるものの2.5[MPa]と同程度であることから本モデルに基づき短期挙動の検討を行う。なお, 応力解析時におけるひび割れ発生後の残留応力の評価は今後の課題である。鉄筋の応力分布は, 図-7と比較して非線形モデルにおいても概ね再現されている。鉄筋に入力される初期応力は短期構成則の弾性域内であるため本手法では連続性が保たれたものと考えられる。

(3) 短期解析の検証(せん断力-部材角関係)

図-10 にせん断力-部材角関係を示す。初期応力を考慮した解析は, 初期剛性や各破壊現象が生じる部材角と良い対応を示している。図-11のコンター図に見られる縦ひび割れの発生時せん断力が大きい原因は, 図-5より水平方向の全ひずみが実験値と同等以上であることから, 初期応力連成手法に起因しているものと考えられる。外主筋が圧縮降伏した点をプロットした。実験値と同一の変形角で生じているが対応するせん断力が大きい。最大耐力後に柱脚帯筋が引張降伏し, 続いて内主筋の圧縮

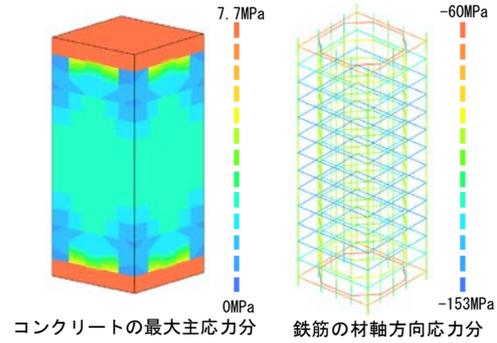


図-7 1443 日目の応力分布コンター

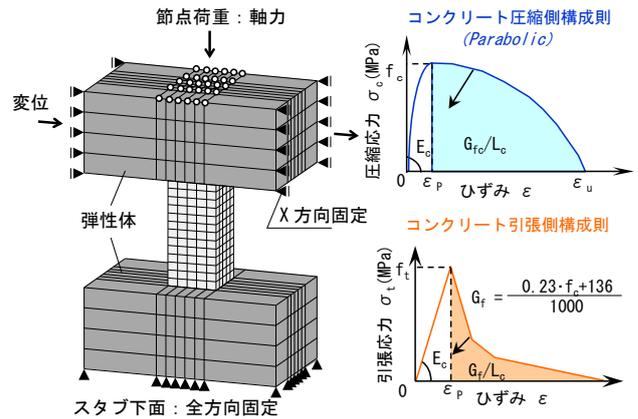


図-8 要素分割図, 境界条件および構成則

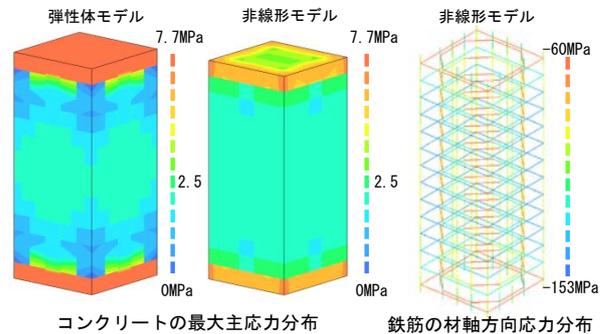


図-9 初期応力の導入結果

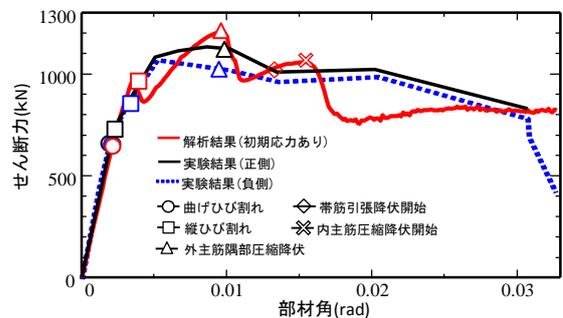


図-10 せん断力-部材角関係(実験値との比較)

降伏の開始に伴い全体挙動が軟化する現象が見られた。図-11に初期応力非考慮モデルとの比較を示す。ここでは, 部材角 0.015[rad]までを図示した。コンター図より柱の高さ方向に沿ってかぶりコンクリートに縦ひび割れが確認でき, このひび割れは初期応力を考慮することで低

下する。これは、図-9 に示すように水平載荷前に引張応力が分布していたためである。最大耐力には約 10[%] の低下がみられる。これは自己収縮ひずみにより主筋に累積された圧縮応力に起因している。以上のことから、初期応力の有無により RC 柱の破壊メカニズムに違いが生じることが確認された。本実験のような縮小模型試験体においては、破壊過程に違いを生じさせる要因として自己収縮ひずみの影響が大きいと言える。

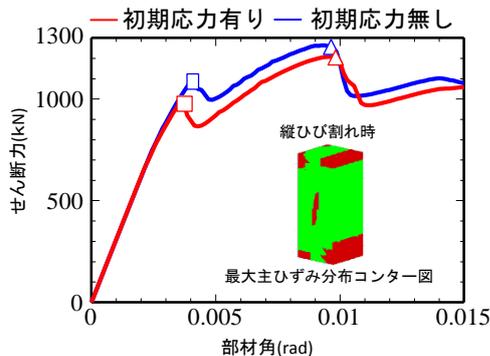


図-11 せん断力-部材角関係 (初期応力有無の比較)

8. まとめ

- 1) 若材齢挙動について、実験値との比較を通じて提案手法が概ね妥当であることを確認したが、解析パラメータの仮定手法については改善が必要である。
- 2) コンクリートにも初期応力を導入することで応力解析により得られた応力状態を概ね再現できるが、ひび割れ発生後の残留応力の評価が新たな課題である。
- 3) 柱に生じるひずみは大部分を自己収縮ひずみが占めており、結果としてコンクリートに引張応力が作用し鉄筋に圧縮応力が累積することから、縦ひび割れ発生時耐力および最大耐力が低下することが明らかとなった。

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。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐々木仁, 高森直樹, 佐藤幸博, 松戸正士, 寺岡勝: 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) ~ (その 3): 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 233-238, 2009. 8
- 2) 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長期圧縮性状: 高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会, 2006
- 3) 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

- 4) 堀川真之, 新藤辰典, 田嶋和樹, 白井伸明: FEM による超高強度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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 55-60, 2014
- 5) de Borst, R. and van den Boogaard, A.H., : Finite-Element Modeling of Deformation and Cracking in Early-Age concrete, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 120, No. 12, pp. 2519-2533, 1994. 12
- 6) Bazant, Z. P, Osman, E. : Double power law for basic creep of concrete, Materials and Structures, RILEM, Paris, Vol. 9, pp. 3-11, 1976
- 7) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research, 2010
- 8) 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. 8
- 9) Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP ModelCode 1990
- 10) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013. 3
- 11) 日本建築学会: マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説, 2008. 2
- 12) 杉山央, 榎田佳寛: セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたコンクリート部材の初期温度上昇予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 623 号, pp. 9-17, 2008. 1
- 13) 河野政典, 榎田佳寛, 上西隆, 起橋孝徳: シリカフュームを使用した 100N/mm² 級高強度コンクリートの発熱・強度特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 20, No. 2, pp. 1015-1020, 1998
- 14) 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
- 15) 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, pp. 1-6, 2000. 3
- 16) J. B. Mander: "Teoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988. 8