

論文 乾燥収縮と長期軸力が柱の曲げ性能に与える影響

李 慶賀^{*1}・ケイ ショウコ^{*2}・渡部嗣道^{*3}

要旨：本研究では、柱に長期荷重によるクリープと乾燥収縮が作用する場合の長期的な性状が、地震動時などの短期的な曲げ性状を明らかとするために、有限要素法による解析的検討を行った。解析モデルはラーメン構造を想定して、両端固定となるように柱の両端にスタブを取り付け、長期解析時と短期解析時の軸力は変動するものとした。この結果、長期解析では、コンクリートの圧縮応力は、乾燥収縮やクリープひずみによって低下し、主筋の圧縮応力は増大した。また、短期解析では、長期軸力によるクリープおよび乾燥収縮が作用した場合には、曲げ耐力に大きな影響を及ぼさないが、最大値までの曲げ剛性は低下した。

キーワード：クリープ、乾燥収縮、有限要素法、柱、逐次積分法

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物では、乾燥収縮やクリープが長期にわたり継続的に生じるため、長期的に部材や建物に何らかの性状変化をもたらす、その長期性状が構造性能に影響を及ぼす恐れがある。現行の構造設計での乾燥収縮の影響は床スラブなどの長期荷重時のひび割れ幅やたわみ算定で一部考慮されているものの¹⁾、柱や梁などからなる骨組の耐震解析ではほとんど考慮されていない²⁾。クリープの影響については許容応力度設計においてヤング係数比として考慮されるものの、乾燥収縮やクリープによる構造物の長期的な性状変化が非線形領域を含めた構造性能に与える影響についての研究は少ない。柱部材については、著者らの知るところによると丸山・勅使川原による解析的な研究³⁾や小室らによる研究⁴⁾が見られる程度であるが、これらはいずれも超高強度コンクリートの領域であり、普通強度コンクリートに関する研究はこれまでほとんどない。また、前川ら⁵⁾は6層集合住宅のモデルによる実大試験体で、乾燥収縮ひび割れが生じた場合の動的実験を行い、独自に開発した時間依存性を有する解析システムを用いてひび割れの影響に関する研究を建物全体の挙動に関して解析的に実施しているが、柱部材に関する詳細な研究は行われていない。

2. 研究目的

著者らは独自に開発したFEM解析ソフトを適用し^{6),7)}、軸力や乾燥収縮ひずみを長期的な負荷として取り扱い、その負荷が短期的な性状として柱の曲げ性能に与える影響について普通強度コンクリートに関する解析的な検討を行った⁷⁾。しかし、その検討範囲は狭く、長期軸力の大きさや軸力変動の影響については十分に検討されていない。そこで、本研究では小室らによる研究⁴⁾を参考として、スタブを受けてそれに両端固定を想定した柱モデルを作成し、長期軸力が作用する中で乾燥収縮ひずみお

よびクリープひずみもそれと同時に生じると予測される場合の柱の長期的な変形特性を解析的に求めることとした。さらに、短期時の軸力変動を考慮するため長期軸力後にそれとは異なる短期軸力が作用する柱の曲げ性状を解析的に評価することも研究目的とした。

3. 解析計画と方法

(1) 基本要素

本研究で使用するFEMソフトでのコンクリート要素は、8節点6面体要素とし、ひび割れ解析には分散ひび割れモデルを用いた。鉄筋要素はトラス要素とし、離散鉄筋とした。本研究では乾燥収縮とクリープの影響のみを評価するために、鉄筋とコンクリートとの接点間は単純化して、主筋要素およびせん断補強筋とコンクリート要素の節点については剛結とした。

(2) 長期解析

乾燥収縮ひび割れやクリープひずみなどによって生じるひび割れなどの変形性状を解析するために、弾塑性解析を伴う逐次積分法（Step by step法）を適用した。ただし、この解析では、2段階の解析を行った。まず、乾燥収縮ひずみが作用して解析step毎に増幅する場合には、FEM解析で多くの実績を有する3次元応力場の主応力と等価一軸ひずみとの関係を求める（例えば8),9)）。さらに、この等価一軸ひずみに対してクリープひずみを求め、等価一軸ひずみに加算する。続いて、第2段階として、コンクリートの主応力と等価一軸ひずみ関係に応じた3次元弾塑性解析を行った。この場合は、瞬時(1stepの短期解析)の破壊として扱う。クリープ解析を含むコンクリートの弾塑性解析（ひび割れ解析）は、以下の(1)~(3)式によるとともに、各ひずみの適合条件は(4)式のひずみの重ね合わせが成立するものとした。ここで、 $\varepsilon_{total}(t)$ ：全ひずみ、 $\varepsilon_e(t)$ ：弾性ひずみ、 $\varepsilon_p(t)$ ：塑性ひずみ、 $\varepsilon_{cr}(t)$ ：クリープひずみ、 $\varepsilon_{sh}(t)$ ：乾燥収縮ひずみ、 $\Delta\sigma(t)$ ：増分応力、

*1 大阪公立大学大学院 生活科学研究科居住環境学専攻

*2 大阪公立大学大学院 生活科学研究科居住環境学専攻

*3 大阪公立大学大学院 生活科学研究科居住環境学専攻

修士（工学）（正会員）

修士（学術）（学生会員）

教授 博士（工学）（正会員）

$\phi(t_{i+1/2}, t_j)$: クリープ係数, $E(t_i)$: ヤング係数, である。

$$\varepsilon_{total}(t_{i+1/2}) = \varepsilon_e(t_{i+1/2}) + \varepsilon_{cr}(t_{i+1/2}) + \varepsilon_p(t_{i+1/2}) + \varepsilon_{sh}(t_{i+1/2}, 0) + \sum_{j=1}^{i-1} \{\Delta\sigma(t_j) \cdot J(t_{i+1/2}, t_j) + \varepsilon_p(t_{i+1/2})\} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma(t_i) = \frac{1}{J(t_{i+1/2}, t_i)} \left\{ \varepsilon_e(t_{i+1/2}) + \varepsilon_{cr}(t_{i+1/2}) \right\} \quad (2)$$

$$J(t_{i+1/2}, t_j) = \frac{1 + \phi(t_{i+1/2}, t_j)}{E(t_i)} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{total}(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{cr}(t) + \varepsilon_p(t) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (4)$$

(3) 短期解析と長期解析との連成

本解析システムは、既報^{6),7)}と同様に長期解析用プログラムと短期解析用プログラムの2つの解析ツールを有するプログラムが連成されている。図-1に示すように、短期解析と長期解析との連成では、長期解析によって得られた変形や応力をそのまま残した状態で短期解析に移行できるようにプログラムが作成されている。ここで、短期解析では、柱の両端の相対的なせん断変位を増分する静的非線形変位増分解析(Pushover)を行う。

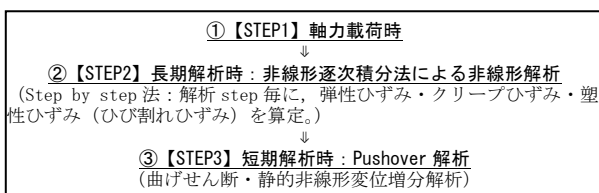


図-1 解析プロセス

(4) 材料構成則

本解析における材料構成則は既報^{6),7)}と同様に長期解析および短期解析とも同じとした。これは、長期解析期間はコンクリートに十分な養生期間を有した竣工後を想定し、コンクリートの物性は長期的に変化しないものとした。コンクリートの1軸応力ひずみ関係を図-2に示す。引張側の応力場については、引張強度や各種力学的性質のほか、引張軟化則については破壊エネルギーを用いた(公社)土木学会『コンクリート標準示方書〔設計編〕(2012)』¹⁰⁾に準拠した。また、圧縮側コンクリートについては、応力ひずみ関係は中村らが提案した圧縮強度までの挙動とそれ以降の圧縮破壊エネルギー¹¹⁾による軟化挙動を用いた方法とし、想定したコンクリートの圧縮強度は27N/mm²とした。さらに、引張側の応力場については、除荷時の履歴は既報^{6),7)}と同様に原点指向型とし、長期解析ならびに短期解析ともこの応力ひずみ関係に沿うとした。また、せん断補強筋のコンクリートに対する拘束効果や脆性的な破壊は生じないとして、既報と同様に^{6),7)}かぶりとコア部分との違いは設けなかった。

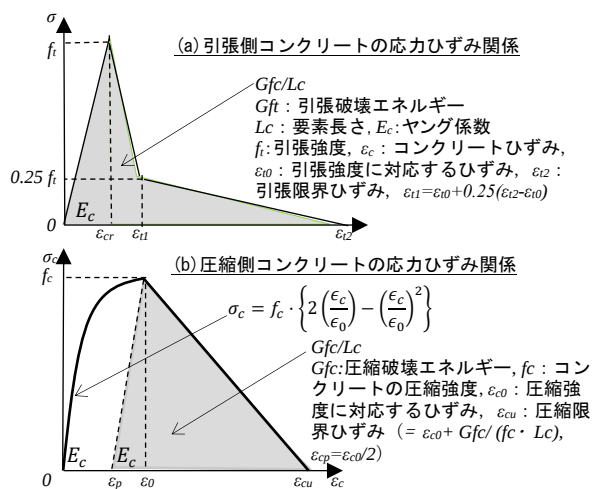


図-2 1軸応力ひずみ関係

また、鉄筋の種類はSD345で離散鉄筋とし、降伏応力を345N/mm²としたバイリニア型の完全弾塑性とした。

(5) 長期解析における設定条件

長期解析における設定条件を表-1に示す。長期解析期間は50年間とした。そして、乾燥収縮ひずみの最終設定値は日本建築学会の見解¹⁾を参考に400×10⁻⁶とした。また、想定したコンクリートは、既往の文献と同じ調査で、単位水量の小さな高性能 AE 減水剤による実用的なコンクリートとした^{6),7)}。乾燥収縮ひずみならびに長期クリープひずみの履歴についても、前報^{6),7)}と同様に『コンクリート標準示方書〔設計編〕(2012)』に準拠した。乾燥収縮ひずみの履歴を図-3に示す。これは、土木学会式を実数倍して、50年間でこの所定の値となるようにした履歴である。同図にクリープ係数の履歴も示す。

表-1 長期解析における設定条件

長期軸力	乾燥収縮ひずみ	湿度	乾燥開始材齢	解析開始材齢	長期解析期間	クリープ係数	圧縮強度
※1	×10 ⁻⁶	%	日	日	年	※2	N/mm ²
0~0.3	400	60	4	365	50	3.5~4.0	27

※1: 設計基準強度に対する比。柱の載荷材齢は乾燥開始材齢と同じ。
 ※2: 載荷開始から50年間におけるクリープ係数を示す。

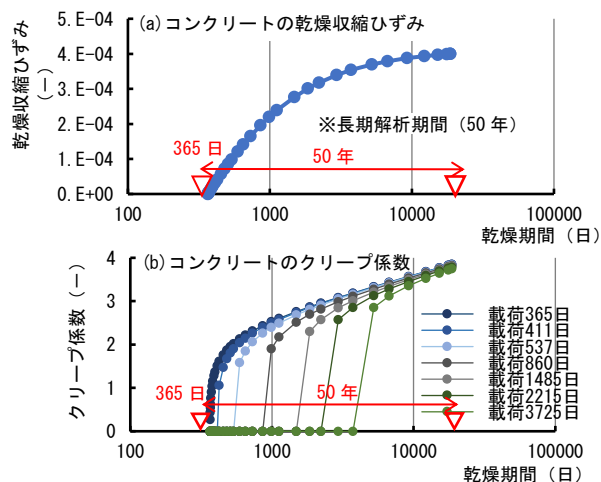


図-3 コンクリートの乾燥収縮ひずみとクリープ係数

4. 長期荷重と解析モデル

(1) 長期荷重とモデルの種類

表-3 に長期荷重と解析モデルの種類を示す。長期解析時の軸力を通常範囲内の 4 レベル設定し(コンクリートの圧縮耐力に対する比), 乾燥収縮の負荷の有無を設定した。さらに, 短期解析における軸力レベルも RC 規準書の上限值に近い 30% を最大とし, 同様に 4 レベルとし, 軸力変動を考慮して長期軸力と短期軸力とを異なる値とした計 32 モデルを解析した。

(2) 解析モデル

柱の解析モデルの断面を図-4 に示す。柱の寸法は, 幅 600×せい 600 の正方形断面に高さ 3000mm の直方体とした。そして, その両端には十分な厚さと幅を持つスタブ(stub)を設けた。柱の上下端は, スラブの中に挿入されている。柱の主筋径は D25 で各辺とも各 5 本・計 16 本設置し, せん断補強筋は D13 でせん断破壊が生じないようにした。また, 柱のコンクリートは図-2 の構成則を有する弾塑性体とし, スタブはヤング係数が図-2 の初期ヤング係数と同じ弾性体とした。ここで, コンクリート表面と主筋中心との距離は柱幅の 0.1 倍した値とした。図-5 に解析モデルの寸法と分割状況を示す。長期解析時においては, 柱とそれと同じ断面のスタブ厚の部分のみ解析対象とし, 短期解析時にはそれにそれ以外のスタブの部分の付与した状態を解析対象として長期と短期の連成解析を行った。

(3) 軸力変動を考慮した加力概要

せん断曲げ性能を評価する場合の解析プロセスと加力概要を図-6 に示す。本解析では柱要素モデルとスタブ要素モデルの複合モデルとなっている。長期解析の場合には, 柱のみの要素モデルに対して上下端からの長期軸力およびモデル自身での乾燥収縮ひずみを負荷するように設定されている(Step1)。長期解析が終了すると, 直ちにスタブが取り付けられ, 短期解析が実施できるようにプログラムが組まれている。柱端部に対するスタブの接合については, 短期解析において, 長期解析での柱の上

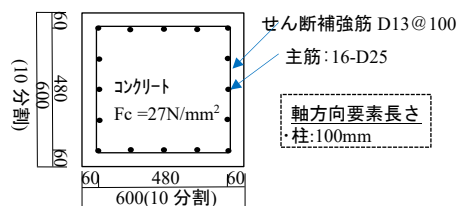


図-4 柱の解析断面

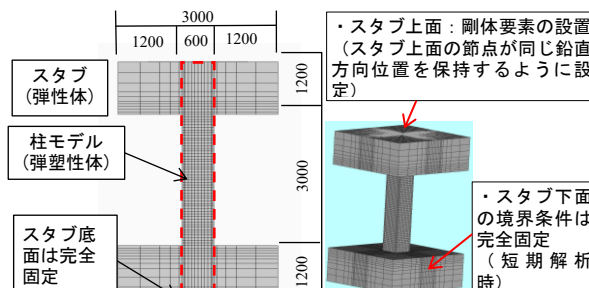


図-5 解析モデル

Step1: 長期解析時は柱モデル要素のみ適用される。
Step2: 長期解析後はスタブ短期解析時に結合される。
Step3: 短期解析時は軸力が作用されるとともに, スラブ上面が水平方向に変位増分移動される。

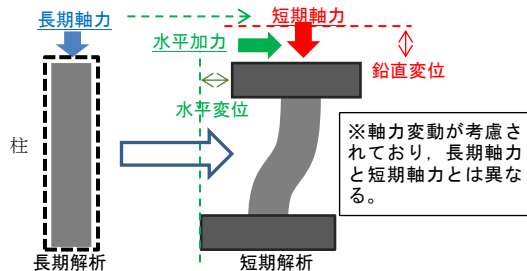


図-6 加力状況

下端部の変形に合致するようにスタブが取り付けられ, そのまま弾性体として挙動するような複合モデルが構築されている(Step2)。また, 本解析では転倒モーメントが建物に作用する場合も想定した軸力変動も考慮しているので, 長期軸力と短期軸力とが異なるため, 長期解析時の軸力から短期解析時の軸力に直ちに切り替えられる。さらに, 図-5 に示すように, 短期解析の場合には柱上端のスタブの上面が水平を保ちながら水平変位(変位増分解析)を受けられるように剛体要素を設け, 軸方向についてはそのまま自由に鉛直変位が生じるような境界条件が設定されている(Step3)。

表-3 解析シリーズ

モデル番号	長期解析		短期解析
	長期軸力（軸力比）	乾燥収縮	短期軸力（軸力比）
1	0%	無, 有	0%
2			10%
3			20%
4			30%
5	10%		0%
6			10%
7			20%
8			30%
9	20%		0%
10			10%
11			20%
12			30%
13	30%		0%
14			10%
15			20%
16			30%

5. 解析結果

5.1 長期解析結果

図-7 に長期解析例(モデル番号 13: 長期軸力比 30%-短期軸力比 0%-乾燥収縮無し)を示す。コンクリートの圧縮応力度は経年とともに減少し, 主筋の圧縮応力度は増大した。これは, コンクリートのクリープ変形によって圧縮応力が緩和され, 軸力の負担がコンクリートから鉄筋に移行しているためである。

図-8 にコンクリートの応力度について, 図-9 に主筋の応力度について, それぞれ経時変化を示す。その値

は柱中央部のコンクリート全断面の平均値を求めた。いずれも荷重初期は圧縮応力度を呈している。コンクリートの圧縮応力度は、クリープによる応力緩和によって荷重初期から経過日数とともに減少した。また、乾燥収縮が作用する場合には、無し場合よりも圧縮応力度の減少量はさらに大きくなり、クリープによる応力緩和をさらに助長する傾向を示した。一方、主筋の圧縮応力度は、コンクリートのクリープによる応力緩和作用によって、コンクリートの場合とは反対に、荷重直後から増大するが、長期には緩やかに増す傾向を示した。また、乾燥収縮が作用する場合のほうがしないものよりも圧縮応力度の増大量はさらに大きくなり、コンクリートのクリープによる応力緩和の影響をさらに助長する傾向を示した。

表-4 に、長期解析によって得られたコンクリートと主筋の初期値と最終値を示す。軸力比が大きくなるほどコンクリートおよび主筋ともに荷重初期値も大きくなるが、最終値も大きくなる。また、乾燥収縮を負荷させることによって、いずれの場合もコンクリートの応力度の減少量は大きくなり、主筋については増大量が大きくなった。主筋の長期許容応力度（降伏点 345N/mm^2 、鉄筋径が D25）は、 215N/mm^2 であるため、本解析結果では、軸力比 30% で乾燥収縮が生じる場合には、その値を最終値で超える結果となった。この結果は、小室らの研究⁴⁾と同様な結果となった。

図-10 に、乾燥収縮の有無の違いに分けて、コンクリートと主筋の軸力負担率の推移を示す。荷重初期は、コンクリートの負担率は 80% 程度、主筋の負担率は 20% 程度である。その後、経過時間とともにコンクリートの負担率は低下する一方で主筋の負担率は増加し、これも小室らの研究⁴⁾と同様な傾向を示したが、その傾向は超強度コンクリートの場合よりも顕著となった。そして、乾燥収縮無しの場合には、両者の負担率は長期的に

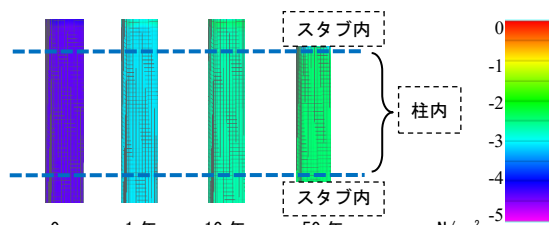


図-7 長期解析における柱コンクリート応力

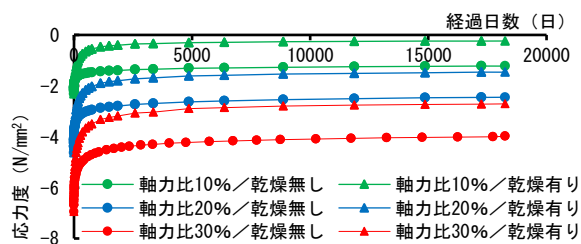


図-8 コンクリート応力度の経時変化

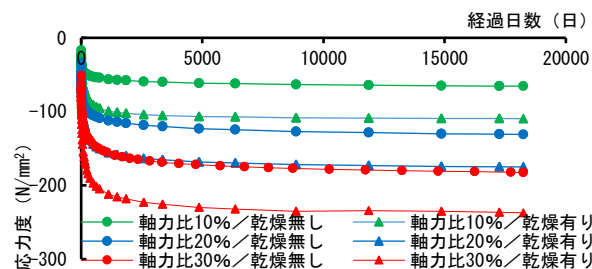


図-9 主筋応力度の経時変化

表-4 各応力度の経年変化

軸力比	乾燥	コンクリート (N/mm^2)		主筋 (N/mm^2)	
		荷重初期	最終値	荷重初期	最終値
10%	無し	-2.32	-1.22 (1.10)	-17.1	-65.5 (-48)
	有	-	-0.238 (2.08)	-	-110 (-93)
20%	無し	-4.63	-2.50 (2.13)	-34.1	-131 (-97)
	有	-	-1.46 (3.17)	-	-175 (-141)
30%	無し	-6.95	-3.98 (2.97)	-51.2	-183 (-132)
	有	-	-2.71 (4.24)	-	-237 (-186)

○内は荷重初期の値に対する最終値の差

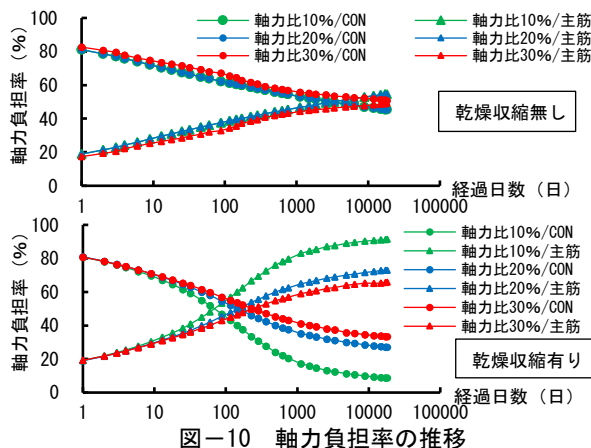


図-10 軸力負担率の推移

ほぼ同じ値となった。乾燥収縮有の場合には、その変化はさらに大きくなり、コンクリートと主筋の負担率は逆転する結果となった。これは、乾燥収縮による圧縮ひずみがさらに増し、主筋への負荷がそれとともに増大したことによると考えられる。また、軸力比の違いによって負担率に大きな差が生じたことは、乾燥収縮の影響が軸力比の小さい場合に対してクリープのみの場合よりも大きな影響を与えることによるものと考えられる。

5.2 短期解析結果

図-11 に、短期解析におけるせん断変形の様子と塑性ひずみのコンターを例示（モデル番号 1）する。

図-12 に、短期軸力比 20% の場合のせん断変形特性を示す。長期軸力 0% で乾燥収縮のない基本モデル（モ

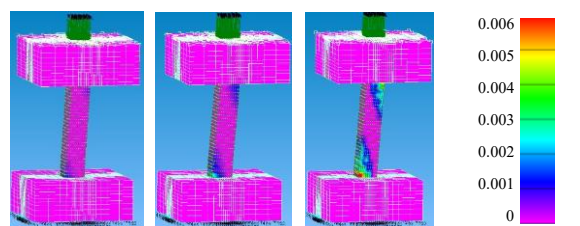


図-11 変形とコンクリート塑性ひずみ度

デル番号 3) に対して、長期軸力 20% によるクリープおよび乾燥収縮が作用した場合のモデル（モデル番号 11）は、最大値までのせん断剛性が低下するとともに最大値もやや小さな値となった。この傾向は他のモデルについても同様であった。

図-13 に、柱最上部における圧縮縁コンクリート要素の応力度と部材角との関係を、図-12 と同じモデルについて示す。長期軸力および乾燥収縮のないモデル番号 3 の場合は、初期軸力による応力がそのまません断力載荷初期の値となっているので、コンクリートの応力ひずみ関係においてはその値から変形が始まるのに対して、他のモデルはそれよりも小さな値から変形するため応力ひずみ関係の履歴に差が僅かであるが生じた。

図-14 に、柱最上部における圧縮縁主筋の応力度を、図-12 と同じモデルについて示す。各モデルの主筋応力の初期値は長期軸力や乾燥収縮の有無によって大きく異なる。本解析の条件では、部材角は 1/100 に達する前に、いずれのモデルについても圧縮鉄筋は圧縮降伏したが、降伏する時点の部材角に大きな差異は見られなかった。なお、圧縮鉄筋による曲げモーメントに対する抵抗力は

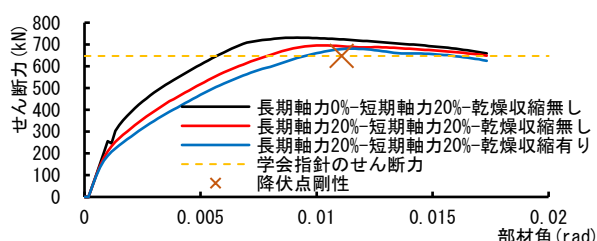


図-12 短期軸力比 20% の場合の曲げ変形特性

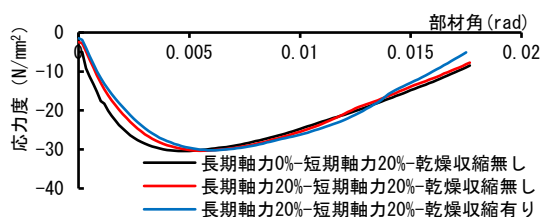


図-13 コンクリート応力度

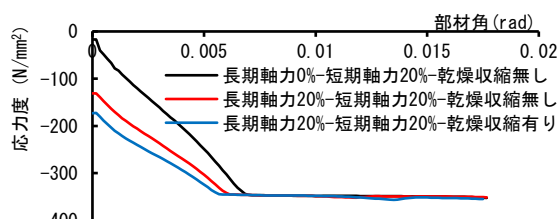


図-14 圧縮縁主筋の応力度

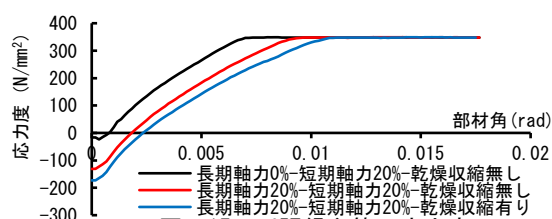


図-15 引張縁主筋の応力度

この初期応力度と変形後の応力度との差で求められるので、長期軸力や乾燥収縮のないモデルのほうの圧縮鉄筋が他のものよりも曲げ抵抗力を有していると思われる。図-15 に、柱最上部における引張縁主筋の応力度を以上と同様のモデルについて示す。長期軸力を有するモデルの主筋応力の初期値は、圧縮応力である。いずれも曲げ変形が増大すると、コンクリートのひび割れ後に引張降伏点に達するが、初期値からの部材角に対する引張応力度の増大率（傾き）がいずれの場合とも同じ程度であるため、圧縮鉄筋の場合と異なり、降伏時の部材角は長期軸力を有する方が大きな値となった。乾燥収縮を有する場合にはさらにその現象を助長した。そのため、鉄筋が降伏するまでの剛性は、長期軸力や乾燥収縮を有するモデルは小さくなると評価できる。以上の結果より、図-12 で標準モデルに対して長期軸力あるいは乾燥収縮のモデルの方の剛性が低下する要因は、クリープに起因した変形初期の潜在応力の変化により曲げモーメントに対する抵抗力が小さくなるために生じたものと考えられる。

5.3 軸力変動を考慮した場合の保有水平耐力との比較

(1) 曲げ耐力について

図-16 と図-17 に、建築学会式²⁾による曲げ終局モーメントから求めたせん断力の計算値と解析結果のせん断力の最大値との比較を、軸力変動を考慮した場合の乾燥収縮の有無の違いについてそれぞれ示す。乾燥収縮の有無に関わらず、長期の軸力比が大きくなると解析値はやや低下する傾向を見せるがその差は僅かであった。さらに、乾燥収縮の有無や長期軸力の大きさに関係なく解析値は計算値をほぼ上回ることから、乾燥収縮の有無や長期軸力によるクリープの影響については、丸山・勅使川原³⁾や小室らの研究⁴⁾と同様に大きな影響を及ぼさない結果となった。

(2) 降伏点剛性を規準とした曲げ剛性について

建築学会の保有水平耐力計算式²⁾による曲げ終局モーメントと降伏点剛性から求めた部材角を求め（図-2 参照）、その降伏点剛性から求めた部材角におけるせん断力を求めた。図-18 と図-19 に、軸力変動を考慮した場合の乾燥収縮の有無の違いについて、建築学会式による計

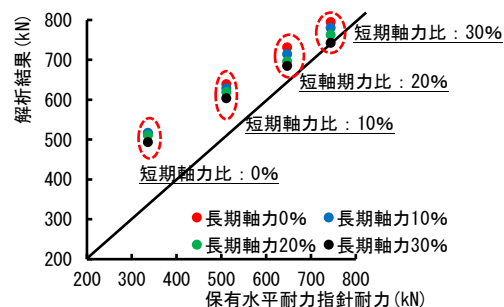


図-16 解析最大値と保有水平耐力との比較
(乾燥収縮無し)

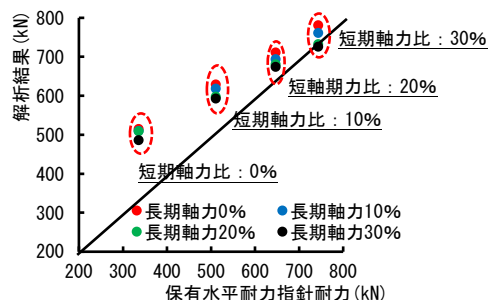


図-17 解析最大値と保有水平耐力との比較
(乾燥収縮有り)

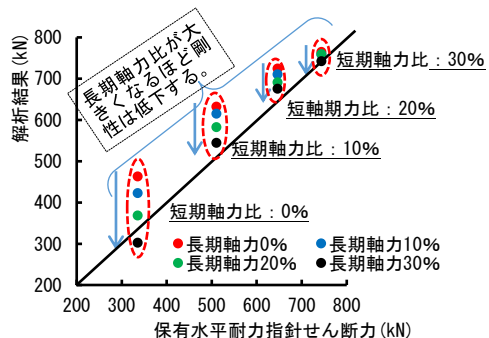


図-18 降伏点剛性時の解析値と保有水平耐力計算値
との比較 (乾燥収縮無し)

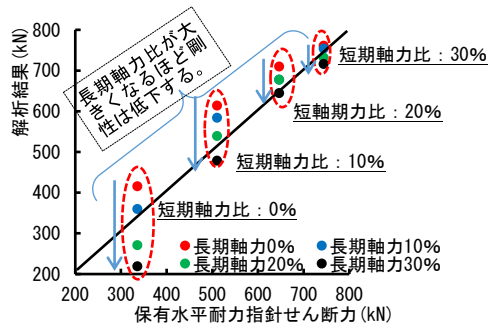


図-19 降伏点剛性時の解析値と保有水平耐力計算値
との比較 (乾燥収縮有り)

算値と解析値との比較をそれぞれ示す。この場合も曲げ終局モーメントの場合と同様に、同一短期軸力の場合、長期軸力比が大きくなるとせん断力も小さくなり、曲げ剛性は小さくなった。そして、学会式による値を下回るモデルも生じた。特に乾燥収縮を生じる場合においてその傾向が顕著となった。

6. まとめ

本研究による解析結果によって以下の知見を得た。

- 1) コンクリートの圧縮応力は、長期軸力が作用する場合のクリープや乾燥収縮などによって低下する一方、主筋の圧縮応力は増大する。
- 2) 主筋の長期応力度は、軸力比 30% で乾燥収縮が生じる場合には長期許容応力度を最終値で超える危険性を有する結果となった。
- 3) 長期軸力負担率について、コンクリート部分については減少し、主筋では増大した。

- 4) 長期軸力によるクリープおよび乾燥収縮が作用した場合には曲げ耐力に大きな影響はないが、最大値までの曲げ剛性は低下する傾向を示した。

【謝辞】

富田耕司氏（ソフトエボリューション株式会社）および佐藤知明氏（阪神高速技術株式会社）には、本研究での多大なご助力を頂きました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2010）
- 2) 日本建築学会：コンクリート構造保有水平耐力計算規準（案）・同解説，2016
- 3) 丸山一平・勅使川原正臣：超高強度コンクリートの自己収縮が RC 柱の曲げ性能に及ぼす影響に関する考察，日本建築学会構造系論文集，No. 630，pp. 1131-1138，2008
- 4) 小室努・今井和正・是永健好・渡邊史夫：超高強度鉄筋コンクリート柱の長期圧縮特性に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 3，pp. 223-228，2008
- 5) Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Structural Concrete: Taylor & Francis, 2009
- 6) XING XIAOHU・渡部嗣道：乾燥収縮の影響を考慮した両端固定梁の曲げ性状に関する解析的研究，日本建築学会構造工学論文集，Vol. 70B, 2024
- 7) 河東宏樹，渡部嗣道，富田耕司，佐藤知明：乾燥収縮とクリープを受ける柱の曲げ性状に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 42, No. 2，pp. 1-6，2020
- 8) 野口博：有限要素法による鉄筋コンクリートの非線形解析 第 1 報：二軸応力下のコンクリートの応力-歪関係，日本建築学会論文報告集，第 252 号，pp. 1-11，1977
- 9) 玉野慶吾・中村光・ほか：PRC はり部材のひび割れ幅経時変化の解析的評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 1，2011
- 10) (公社) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2012
- 11) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, pp. 259-272, 1999, JCI