

# 論文 乾燥収縮ひび割れが構造性能に与える影響に関する解析的研究

渡部 嗣道\*1・富田 耕司\*2・張 殿宇\*3

**要旨:** 鉄筋コンクリート構造物では、大きな乾燥収縮ひずみが生じる場合、部材間の拘束によって乾燥収縮ひび割れが生じる事例が報告され、構造性能や耐久性に与える影響が危惧されている。本研究では、その乾燥収縮ひずみが構造性能に及ぼす影響を評価するために、ラーメン構造を対象としたフルモデルにおいて、著者らが開発した3次元非線形有限要素法解析ソフトを使用し、乾燥収縮ひび割れ解析と Pushover 解析とを連成実行し、構造性能への影響を評価した。その結果、乾燥収縮ひずみによって、一部の部材に損傷が生じるとともに、保有水平耐力が減少する結果が得られた。

**キーワード:** 有限要素法, 乾燥収縮ひび割れ, クリーブ, Step-by-step 法, 保有水平耐力, Pushover 解析

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物にひび割れが発生すると、耐久性や構造性能に支障を生じることがある。前川ら<sup>1)</sup>は、6層の集合住宅をモデル化した実大試験体で、乾燥収縮ひび割れを生じさせた場合の動的破壊実験で、その影響によって大きな変形を生じることを実験的ならびに解析的に評価している。しかし、この研究の他には、乾燥収縮ひび割れと構造性能との関係に関する実物大を想定した解析的な研究はほとんど見られない。

一方、著者らは、前報<sup>2)</sup>において、構造物全体におけるひび割れ進展の状況の評価するために、著者らが開発した時間依存性を考慮した3次元静的非線形有限要素法解析用ソフトウェア「Soft OCU」によって、鉄筋コンクリート構造物の乾燥収縮によるひび割れ解析をフルモデルで行い、乾燥収縮が構造体(柱・梁)の性能に与える影響を検討して、同部材に生じるひび割れの進展や鉄筋応力についての考察を行った。本研究では、それに引き続いて、乾燥収縮ひび割れ解析後に Pushover 解析を行う連成解析を実施し、乾燥収縮ひずみによる部材の損傷の程度や保有水平耐力の評価など、乾燥収縮ひび割れが構造性能に及ぼす影響を分析する。

## 2. 解析概要

### 2.1 対象建物とモデル化

本解析で対象とした建物は、前報<sup>2)</sup>と同様に実際に建設された鉄筋コンクリート造の純ラーメン構造の集合住宅を参考とし、地上10階・桁行方向3スパンの構造体モデルを作成した。部材は、柱・梁・スラブ・基礎からなり、その寸法や鉄筋量は、設計図書における構造図とほぼ同等にした前報<sup>2)</sup>と同じとした。設計基準強度および主筋の鉄筋比は、階数ごとに異なる。図-1に本解析モ

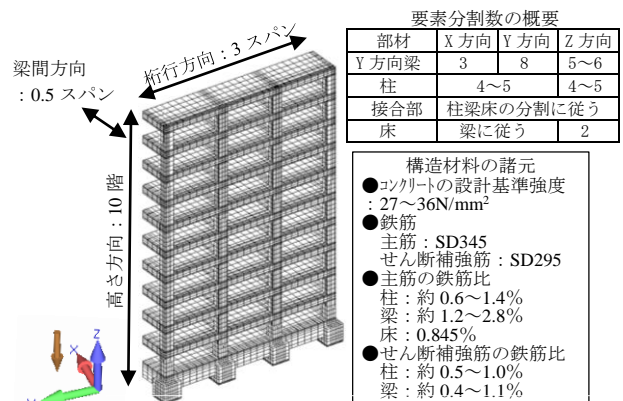


図-1 解析モデル (1/2モデル)

デルを示す。平面計画の対称性により、図中のYZ方向の平面を対称とした1/2モデルとした。また、基礎下部の地盤に対する固定度について、この値が大きくなると上部構造物に対する拘束率が高まり、ひび割れの危険性が増すと考えられる。今回の解析では、地盤による拘束の程度を最小限にし、部材間のみの拘束の条件下で評価するために、地盤との拘束がほとんど生じないよう基礎下部にヤング係数を低く設定したダミー要素を設けた。

### 2.2 解析ソフト

本研究で使用した解析ソフトは、前報<sup>2)</sup>で使用した3次元静的非線形有限要素法解析用ソフトウェア「Soft OCU」を、さらに Pushover 解析を連成することができるように改良したものである。すなわち、同ソフトでは、図-2に示すように、乾燥収縮ひずみによるひび割れ発生に伴う非線形解析を、クリーブひずみの発生も含めた逐次積分法(Step-by-step法)を用いて実行した後、各種応力およびひずみを残留した状態で、水平力による Pushover 解析を行うことができる。

ひび割れ解析は、前報<sup>2)</sup>と同様に以下の(1)~(3)式によ

\*1 大阪市立大学 大学院生活科学研究科教授 工(博) (正会員)

\*2 ソフトエボリューション(株) (正会員)

\*3 大阪市立大学 大学院生活科学研究科 (非会員)

るものとするとともに、各ひずみの適合条件は(4)式のように各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、 $\phi(t_{i+1/2}, t_j)$ ：クリープ係数、 $E(t_j)$ ：ヤング係数

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

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

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

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

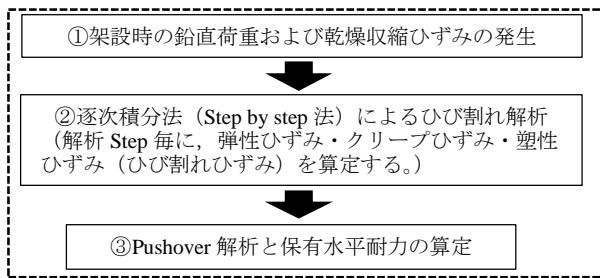


図-2 本研究における解析プロセス

また、コンクリートのひび割れモデルは、分散ひび割れモデル<sup>4)</sup>(ひび割れ面での応力伝達は回転ひび割れモデル)、鉄筋は分散鉄筋モデルとし、コンクリートとの付着は完全一体とした。要素に存在する鉄筋は、柱および梁については、主筋およびせん断補強筋の鉄筋比の値を均一に配置したものとし、スラブについては平面方向の2方向(x, y方向)について所定の鉄筋比とした。また、非線形解析における反復計算法は修正ニュートンラプソン法を適用した。本ひび割れ解析では、架構の新設による初期弾性応力に応じてクリープひずみの増分計算し、この架構の乾燥収縮ひずみの増加に伴って生じる弾性ひずみならびにクリープひずみを同様に増分解析し、ひび割れが発生する場合には塑性ひずみの増分解析も行っている。

### 2.3 材料モデル

コンクリートの応力-ひずみ関係を図-3に示す。引張域については、引張強度までは直線とし、そのヤング係

数 $E_c$ を圧縮強度から推定する日本建築学会式<sup>5)</sup>を適用し、引張強度も同学会式を適用し、持続的応力による低減係数を「0.75」とし、ひび割れ発生は引張主応力が引張強度に達した時点とした。また、塑性域における引張軟化則は、白井式<sup>6)</sup>を適用した。

一方、圧縮域については、前報<sup>2)</sup>と同様に、道路橋示方書・同解説(V耐震設計編)に準拠し、圧縮破壊の判定は圧縮主応力が圧縮強度に達した時点とした。

図-4に引張域の弾性ひずみと塑性ひずみの定義を示す。そして、この弾塑性解析で求めた塑性ひずみ $\varepsilon_p$ を「ひび割れひずみ： $\varepsilon_p$ 」、引張軟化領域の大きさを「軟化ひずみ： $\varepsilon_u$ 」として、前報<sup>2)</sup>と同様な定義をしている。

図-5に引張域におけるひずみ減少時の応力ひずみ関係を示す。弾性域および塑性域ともに、図-4の応力ひずみ関係の途中で、ひずみが減少する場合の応力-ひずみ関係は原点を結ぶ直線の履歴を経るものとした。

柱・梁の主筋はSD345、せん断補強筋およびスラブの

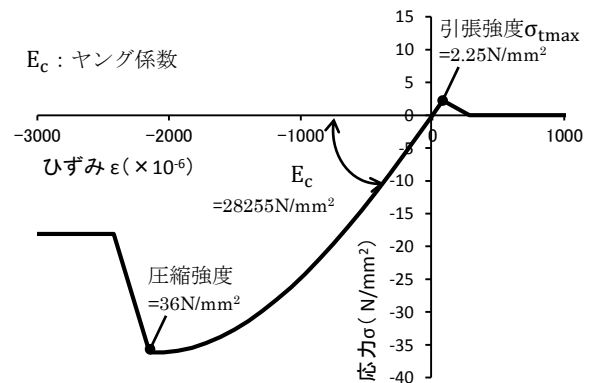


図-3 コンクリートの応力ひずみ関係 (設計基準強度 36N/mm<sup>2</sup>の場合)

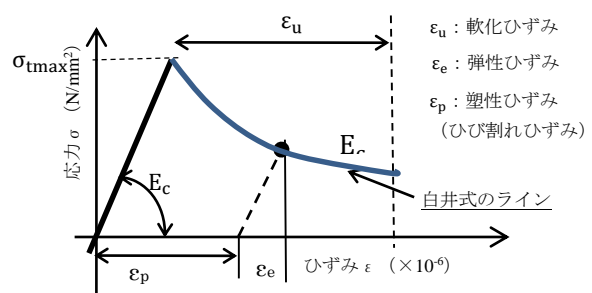


図-4 コンクリート引張域における塑性ひずみ

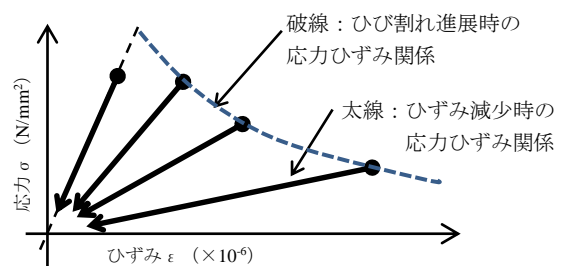


図-5 ひずみ減少時における応力ひずみ関係

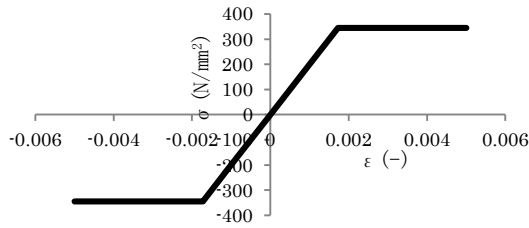


図-6 鉄筋モデル (SD345)

鉄筋はSD295とし、応力-ひずみ関係については図-6に示すようにバイリニア型とした。

## 2.4 自重ならびに乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数

自重は、コンクリートと鉄筋との複合体の単位体積重量を2.3kN/m<sup>3</sup>とした。

乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数は、日本建築学会式<sup>5)</sup>を用いた。本解析では、建物全体が一斉に架構されると仮定して新設架構され、その時点から初期弾性ひずみと乾燥収縮ひずみが発生するものとし、柱・梁ならびにスラブの値を同一とした。乾燥収縮ひずみ算定の発生開始を脱型時の材齢3日としたが、架構全体に収縮ひずみによる応力が発生する時期は、新設時で支保工を取り外す材齢28日経過時からとし、非線形解析における応力発生初期材齢はこの時点とした。基礎および基礎梁は、地中にあるものとし、乾燥収縮は生じないものとした。

乾燥収縮ひずみの大きさは、架設後の値が目標値になるように、単位水量を185、195あるいは215kg/m<sup>3</sup>とした調査とし、相対湿度を65%としたうえで、乾燥後の経過時間を決定した。表-1に本解析で部材に作用させる乾燥収縮ひずみの目標値を示す。本解析期間の範囲の乾燥収縮ひずみの作用値は、0~1000×10<sup>-6</sup>を目標として、建築学会式に当てはめた値が目標値となるように乾燥材齢を決定した。図-7に乾燥収縮ひずみの履歴と乾燥材齢の決定方法を示す。

さらに、クリープ係数の履歴例を図-8に示す。建築学会式による場合、材齢28日以降の荷重によるクリープ係数の収斂値は概ね1.0程度の値を示す。

表-1 乾燥収縮ひずみ

解析番号	架設からの目標値 (×10 <sup>-6</sup> )	乾燥開始からの算定値 (×10 <sup>-6</sup> )	材齢 (日)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )
1	0	73	28	185
2	200	273	340	
3	400	473	1237	
4	600	674	4298	195
5	800	880	19871	
6	1000	1095	36363	

## 2.5 Pushover 解析と保有水平耐力

乾燥収縮ひずみの目標値を各々作用させた後に、Pushover 解析を行った。各層の水平力は、建築基準法に

おけるAi分布（建物の高さ方向の層せん断力分布係数）に基づいた各層の比となるように設定し、徐々に増分させた。この水平力は、各層の床スラブのFEMモデルの節点に作用させ、その各層の合計の比がAi分布と同等になるようにした。また、Pushover解析後は、層間変形角と層せん断力との関係を求め、最大となる層間変形角が最初に限界変形角に達した時点での1階の層せん断力を保有水平耐力とした。本研究では、この限界変形角の指標を一般的な構造設計での奨励値である1/100とした<sup>7)</sup>。ただし、本研究のように劣化後の構造性能の評価を行う場合でもこの指標を用いることへの適性や他の限界変形とした場合の評価については、今後の検討課題とする必要がある。

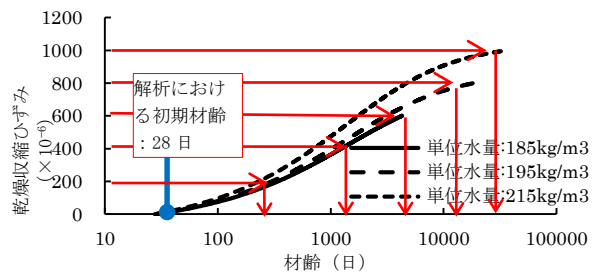


図-7 非線形解析での乾燥収縮ひずみの発生履歴

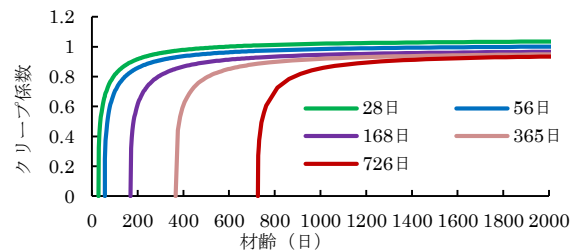


図-8 クリープ係数の履歴例

## 3. 解析結果と考察

### 3.1 乾燥収縮ひずみによる部材の変形と応力

#### (1) 乾燥収縮ひずみによる部材の損傷と検討項目

図-9に、解析4の場合の乾燥収縮ひずみの目標値を作用させた場合における塑性ひずみ（3方向ひずみベクトルの絶対値：ひび割れひずみ）の発生状況を示す。梁および柱について最も大きな塑性ひずみを生じていたのは低層階の梁であったが、この他、上層階を含めた梁端部や1階柱脚部にも塑性ひずみが生じた。この他の解析でも、これと同様な箇所に塑性ひずみ（ひび割れひずみ）が生じた。そこで、本研究では、図-9に示すように、乾燥収縮ひずみによる部材の変形と損傷について、柱については外柱の層間変形角、梁については中間スパン梁に関する軸方向応力、塑性ひずみ、拘束率について評価することとした。なお、各評価値の経時変化について、表-1の解析1~3は解析4と同じ材料条件であるから、ここでは解析4~6について検討した。

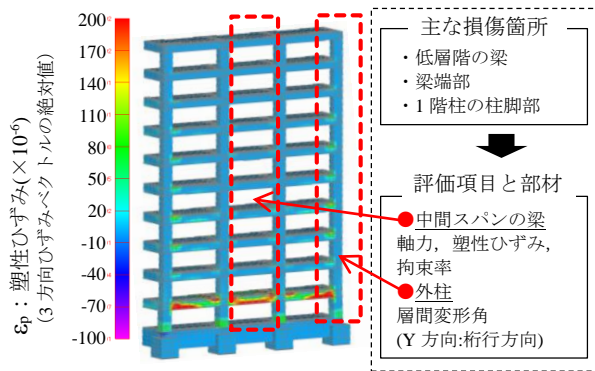


図-9 乾燥後の塑性ひずみ (解析4)

(2)層間変形角

図-10~12に、各階の桁行方向に関する層間変形角の経時変化を示す。この値は、各階スラブ位置の外柱の変形から求めた。いずれの解析番号についても1および2階に大きな層間変形角が生じ、1階であれば0.0012程度(1/800程度)、2階であれば0.0005~0.0006(1/2000程度)程度であった。解析5および6については、それを上限として、経過時間とともにその値を保つかやや減少する傾向を示した。図-9の1階柱脚部に塑性ひずみが生じたのは、以上の層間変形によるものと考えられる。

(3)梁に作用する軸方向平均垂直応力

表-2に、梁部材の圧縮強度と引張強度を示す。また、図-13~15に、桁行方向の梁に作用する軸方向平均垂直応力の経時変化を示す。対象とした梁は、3スパンのうちの中央の梁で、平均垂直応力は梁中央部の要素群の軸方向(桁行方向)の直角断面における垂直応力の平均値とした。解析4については、引張強度に達したのは2階の梁のみであった、解析5および6については上層階についても引張強度に達していた。ただし、引張強度に達した後は、その値を保持するか緩やかな減少の傾向を示した。なお、梁断面の引張応力の分布について、評価対象が梁中央部の要素群であることから、下面が最も大きく、上面になるほどその値は小さくなる傾向を示した。

(4)梁のY方向の塑性ひずみの平均値

平均軸力と同様に、同じ梁位置および要素群の塑性ひずみ(Y方向成分)の平均を求めた。図-16~18に、その経時変化を示す。解析4では乾燥収縮ひずみが比較的小さいので2階のみ塑性ひずみが生じているが、さらに乾燥収縮ひずみが大きい解析5や解析6では上層階でも塑性ひずみが生じるようになった。

(5)拘束率(Y方向ひずみ成分で算定)

これも平均軸力と同様に、同じ梁位置および要素群の拘束率を求めた。拘束率の算定方法は既報<sup>8)</sup>と同様である。図-19~21にその経時変化を示す。2階では0.4~0.7程度の高い値を示したが、高層階ではそれよりも低い値となった。ただし、解析6については、高層階でも徐々

に大きな値を示した。このように、梁が拘束されて引張応力が発生し、ひび割れが生じたものと考えられる。

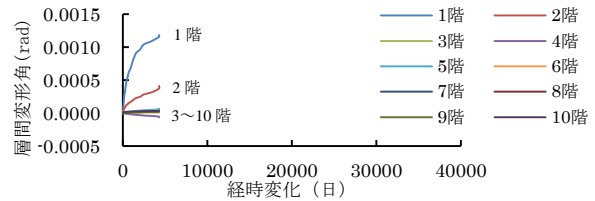


図-10 層間変形角の経時変化 (解析4)

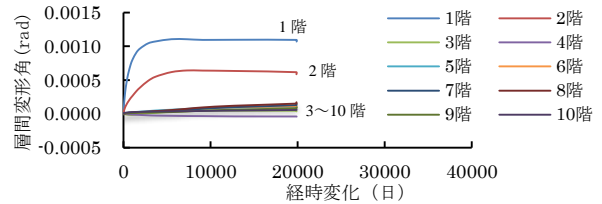


図-11 層間変形角の経時変化 (解析5)

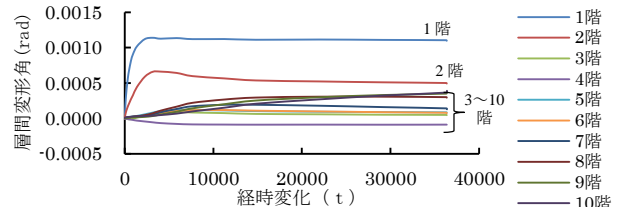


図-12 層間変形角の経時変化 (解析6)

表-2 梁部材の引張強度

階数	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	階数	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
2	36	2.25	4~7	30	1.96
3	33	2.11	8~R	27	1.81

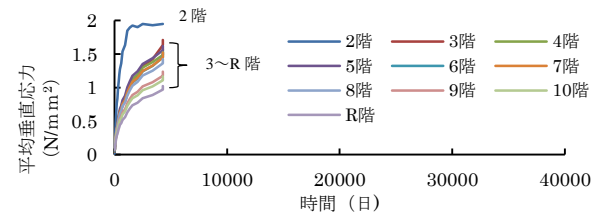


図-13 軸方向平均垂直応力の経時変化 (解析4)

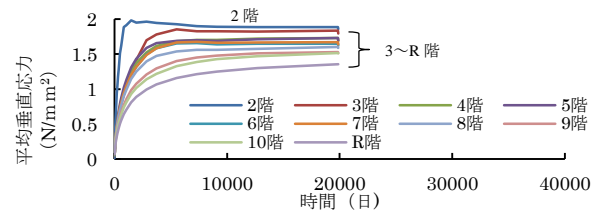


図-14 軸方向平均垂直応力の経時変化 (解析5)

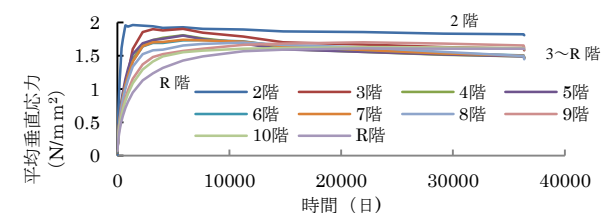


図-15 軸方向平均垂直応力の経時変化 (解析6)



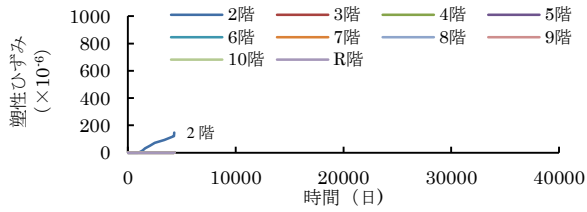


図-16 平均塑性ひずみの経時変化 (解析 4)

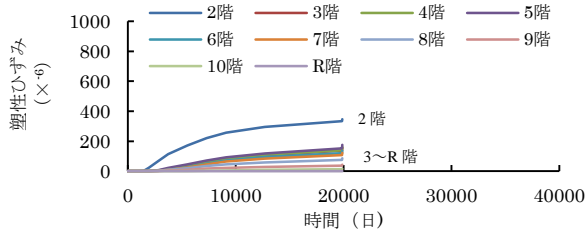


図-17 平均塑性ひずみの経時変化 (解析 5)

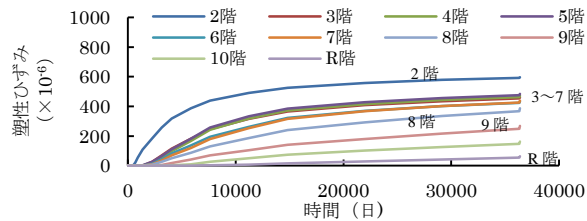


図-18 平均塑性ひずみの経時変化 (解析 6)

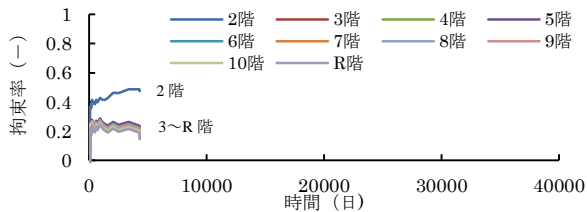


図-19 拘束率の経時変化 (解析 4)

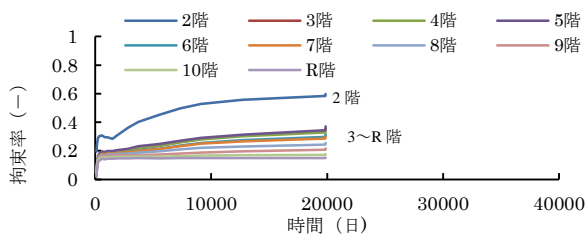


図-20 拘束率の経時変化 (解析 5)

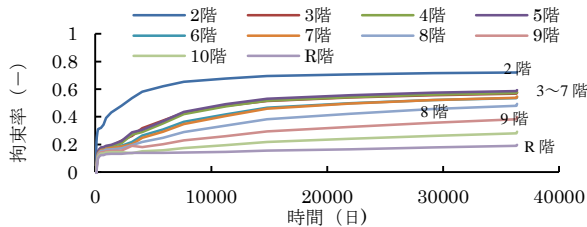


図-21 拘束率の経時変化 (解析 6)

### 3.2 Pushover 解析

#### (1)市販構造解析ソフトによる場合

市販の一環構造計算ソフト「Super Build/SS3<sup>9)</sup>」による解析を行った。解析モデルは立体フレームモデル (材端

パネ) であり、これに Pushover 解析を行った。層間変形角 (桁行方向) と層せん断力との関係を図-22 に示す。本解析で求められた保有水平耐力は 4413kN であった。

#### (2)乾燥収縮ひずみ作用後の解析

図-23 に、乾燥収縮ひずみ作用後の Pushover 解析による変形例を示す。これは、4 階の層間変形角が限界変形である 1/100 に達した時点のものである。梁端部に曲げ変形による大きな塑性ひずみ (3 方向ひずみベクトルの絶対値) が低層階から中層階において生じていることが観察された。

図-24~26 に、解析 1~6 のうち、Pushover 解析を行った代表的な例を示す。1/100 の層間変形角 (限界変形角) に達する階は、低収縮ひずみの場合は、SS3 の解析結果と同様に 3 階であったが、収縮ひずみが大きくなると、その階数は高くなる傾向を示した。また、限界変形角に達する時点の 1 階の層せん断力を保有水平耐力とした場合には、その値は収縮ひずみが大きくなるほど小さくなる傾向を示した。これらの結果をまとめたものを、表-3 および図-27 に示す。SS3 の計算結果に対する乾

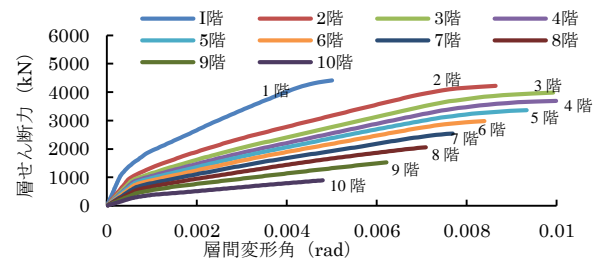


図-22 層間変形角と層せん断力との関係 (SS3)

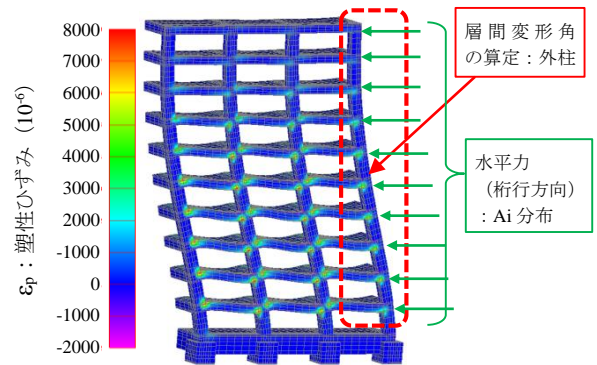


図-23 Pushover 解析での塑性ひずみ (解析 4)

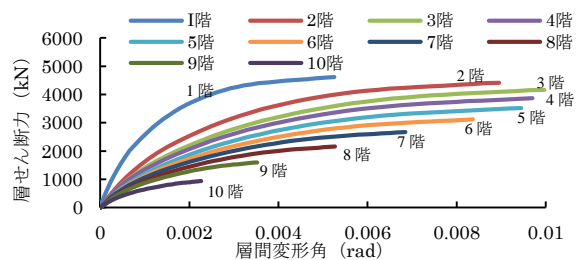


図-24 層間変形角と層せん断力との関係 (解析 1)

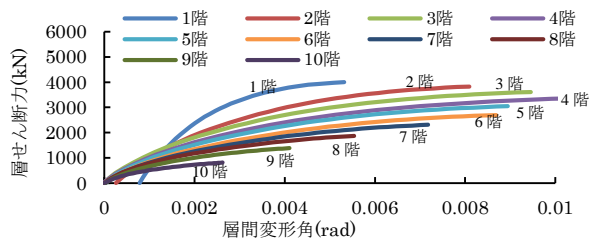


図-25 層間変形角と層せん断力との関係（解析3）

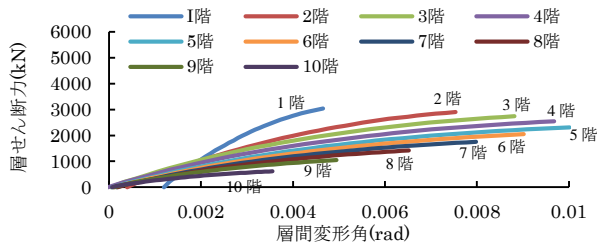


図-26 層間変形角と層せん断力との関係（解析5）

表-3 保有水平耐力

	解析番号	乾燥収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	限界変形の到達階	保有水平耐力 (kN)	無収縮に対する比
構造解析ソフトSS3	-	0	3	4413	-
「Soft OCU」による解析	1	0	3	4648	1.000
	2	200	3	4382	0.943
	3	400	4	4002	0.861
	4	600	4	3613	0.809
	5	800	4	3039	0.654
	6	1000	5	2527	0.544

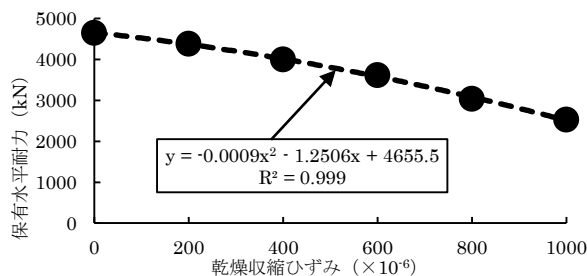


図-27 乾燥収縮ひずみと保有水平耐力との関係

乾燥収縮ひずみのない場合の計算結果との比は、1.05であり、ほぼ同等の結果となった。また、乾燥収縮のない場合に対して収縮のある場合の値の比は、目標乾燥収縮ひずみが  $400 \times 10^{-6}$  で 0.861、 $800 \times 10^{-6}$  で 0.654、 $1000 \times 10^{-6}$  で 0.544 であった。 $1000 \times 10^{-6}$  程度作用した場合には 50% 近く低下する結果となった。このように収縮ひずみが大きくなるほど、保有水平耐力の算定値が小さくなる要因として、図-13~15 のように梁に引張応力が生じ、梁部材の曲げ耐力が低下したこと、あるいは図-16~18 のように梁部材の塑性ひずみ（ひび割れ歪み）が増大することによって梁の曲げ剛性が低下したこと、さらに、図-9 に示したように層間変形が生じて低層階の柱脚部や各層の梁端部に塑性ひずみが生じたことなどによって、建物

の構造性能が低下したことが考えられる。ただし、本研究だけでは、これらの要因は明確にはならないので、今後はさらに詳細な検討が必要である。

#### 4. まとめ

著者らが開発した 3次元非線形解析用ソフトウェア「Soft-OCU」によって、鉄筋コンクリート造ラーメン構造の乾燥収縮ひび割れ解析を行い、引き続き Pushover 解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 乾燥収縮ひずみが生じると水平部材には層間変形が生じ、それは下層階になるほど大きくなる。そのため、1階の柱脚には塑性ひずみが生じる。
- 2) 同様に、乾燥収縮ひずみが生じると、梁は柱や基礎梁などの拘束を受け、軸方向に引張力を受けてひび割れが生じる。塑性ひずみは低層階ほど大きくなる傾向を示す。
- 3) 乾燥収縮ひずみが生じた後に Pushover 解析を行って保有水平耐力を求めた場合、乾燥収縮ひずみが大きいほど保有水平耐力は低下した。これは、乾燥収縮ひずみによって梁に引張応力やひび割れが生じることや、低層階の柱脚部が損傷されることなどによって、建物の水平方向の構造性能が低下したことによるものと考えられる。
- 4) 本解析で適用した限界変形角の適否やこのような構造性能の低下の要因についてはさらに詳細な検討が必要である。

#### 【参考文献】

- 1) Multi-Scale Modeling of Structural Concrete (2008), K. Maekawa, T. Ishida and T. Kishi, Taylor and Francis
- 2) 渡部嗣道, 張 殿宇, 富田耕司: 鉄筋コンクリート構造物のフルモデルによる乾燥収縮ひび割れ解, コンクリート年次論文報告集, Vol37, No.2, pp85-90, 2015
- 3) 大阪市立大学・ソフトエボリューション社製: 「Soft OCU (FEM SOFTWARE ORIENTED TO CREEP AND ELASTO-PLASTIC ANALYSIS FOR ULTIMATE PROPERTIES OF CONCRETE STRUCTURES)」, 2015
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書「設計編」, 2012
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006
- 6) 佐藤稔雄, 白井伸明: 鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究 (その 6: 引張応力-歪曲線にボンド特性を考慮した非弾性解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1615-1616, 1978.9
- 7) 日本建築学会, 建築耐震設計における保有耐力と変形性能 (1990), pp.53-63, 1990
- 8) 森井万葉, 渡部嗣道: RC ラーメン構造の乾燥収縮ひび割れ発生評価に関する施工工程を考慮したフルモデル解析, コンクリート年次論文報告集, Vol36, No.2, pp49-54, 2014
- 9) ユニオンシステム(株): Super Build/SS3 解説書, 2015