

時間依存性自己ひずみによる劣化ひび割れに関する解析的研究 (その1. 研究課題と解析概要)

正会員 ○渡部嗣道*1 同 張 殿宇*2 同 富田耕司*3

2. 構造—8. 鉄筋コンクリート構造—g. 構成則・解析法 FEM, 自己ひずみ, クリープ, RC 造建物, ひび割れ

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に、乾燥収縮ひずみなどの自己ひずみによる劣化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恐れがある。そのため、ひび割れの発生メカニズムの解明や対策など、数多くの研究がこれまで多く行われている。特にひび割れ幅に関しては、その大きさが水密性や耐久性などに及ぼす影響が大きく、ひび割れ幅の推定式なども提案¹⁾されているとともに、今日では材料学的方法によりひび割れのない技術開発なども行われている。しかし、乾燥収縮ひび割れが構造性能に及ぼす影響に関する研究は少なく、いまだ十分に解明されていない。これは、同ひび割れが構造性能及ぼす影響は小さいと考えられているためと思われる。

前川²⁾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、その影響によってひび割れのないものよりも大きな変形を生じ、乾燥収縮ひび割れが構造性能に支障を与え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、既報³⁾において、構造物全体におけるひび割れ進展の状況を評価するために、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. 解析ソフト

本研究で使用した解析ソフトは、既報³⁾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⁴⁾を用いた。すなわち、同ソフトでは、表-1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、クリープ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ままで、水平力による Pushover 解析を行うことができる。

Pushover 前のひび割れ解析では、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を増分計算するとともに、この架構後に発生する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も同様に増分解析し、ひび割れが発生する

表 1 基本仕様

項目	概要
1	乾燥収縮ひずみによるひび割れ発生に伴う弾塑性解析を、クリープひずみの発生も含めた逐次積分法(Step by step 法)で実施(ひずみの時間依存性を考慮した弾塑性解析)できる。
2	架設工程(施工工程に沿って新設階層毎に架構モデルを構築)を考慮できる。
3	フルモデルに対応した容量の要素数の処理が可能である。
4	FEM 要素は鉄筋とコンクリートとの複合則で構成されている。
5	長期的なひび割れ解析後から、静的非線形増分解析(Pushover)が可能である。

An analysis study on the influence of autogenous cracking on structure performances
(Part.1 A research theme and analysis summary)

WATANABE Tsugumichi, ZHANG Dianyu and TOMITA Koji

場合には塑性ひずみの増分解析も行う。この他、施工工区あるいは工程ごとに連続して解析できるように架構モデルを作製することが可能であり、架構工程が構造性能に及ぼす影響も評価することができる⁶⁾。

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（ひび割れ面での応力伝達は回転ひび割れモデル）⁵⁾、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ている。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ており、本解析におけるソルバーは、「NEI-Nastran」を使用している。

ひび割れ解析は、既報³⁾と同様に以下の(1)~(3)式によ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、 $\theta(t_{i+1/2}, t_j)$ ：クリープ係数、 $E(t_i)$ ：ヤング係数

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

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

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

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

3. 材料モデル

コンクリートの応力-ひずみ関係を図-1に示す。引張域について、引張強度までは線形弾性とし、その場合のヤング係数 E_c を圧縮強度から推定する日本建築学会式⁵⁾を適用した。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」として引張破壊応力度を、引張強度にこの低減係数を乗じた値とした。ひび割れ発生は引張主応力がこの引張破壊応力度に達した時点とした。また、引張破壊後の塑

性域における引張軟化則は、白井式⁷⁾を適用した。

一方、圧縮域については、非線形弾性として道路橋示方書・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-2に引張域の弾性ひずみと塑性ひずみの定義を示す。この弾塑性解析で求めた塑性ひずみ ε_p を「ひび割れひずみ： ε_p 」、引張軟化領域の大きさを「軟化ひずみ： ε_u 」とした。また、引張応力度が引張破壊応力度に達してさらにひずみが塑性域に達した場合の塑性ひずみ ε_p と弾性ひずみ ε_e との算定を同図に定義した。

図-3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、応力ひずみ関係の途中で、除荷などにより引張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鉄筋はSD295とし、応力-ひずみ関係については図-4に示すようにバイリニア型とした。

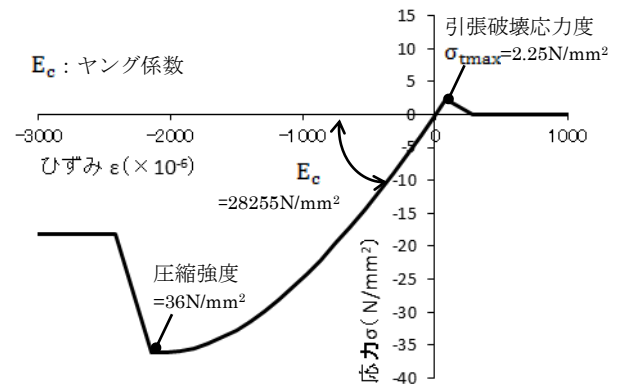


図-1 コンクリートの応力ひずみ関係（設計基準強度 36N/mm²の場合）

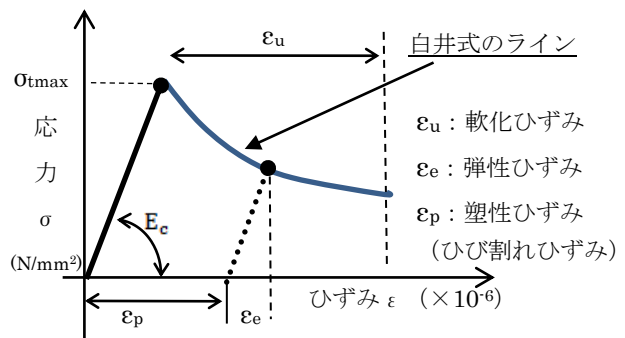


図-2 コンクリート引張域における塑性ひずみ

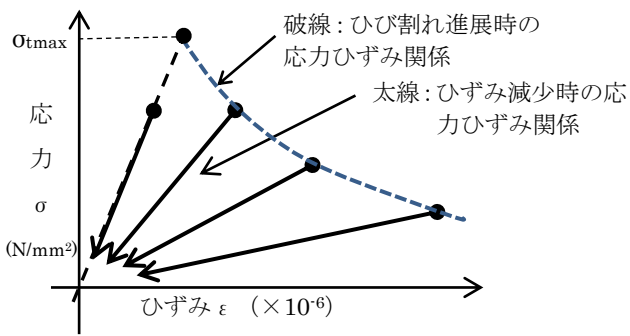


図-3 ひずみ減少時における応力ひずみ関係

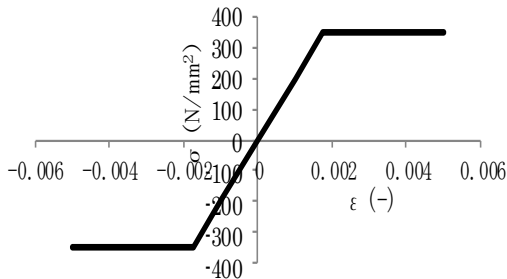


図-4 鉄筋モデル (SD345)

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。

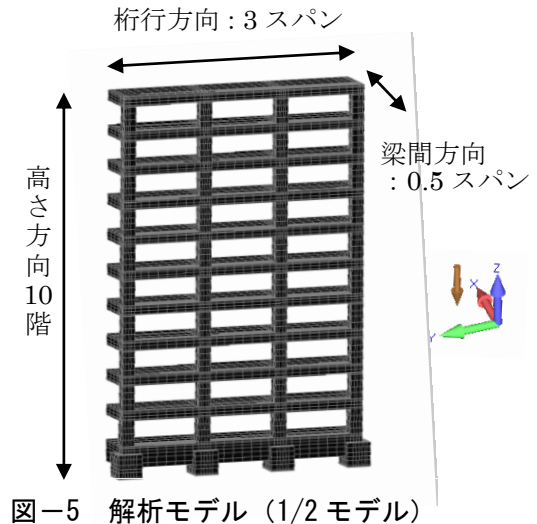


図-5 解析モデル (1/2 モデル)

4. 解析モデル

4.1 対象建物とモデル化

本解析で対象とした建物は、既報³⁾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たものであるが、今回は地上 10 階・桁行方向 3 スパンとした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既報³⁾と同じとした。図-5 に本解析モデルを、図-6 に示す。設計基準強度および主筋の鉄筋比は、階数ごとに構造材料の諸元を示す。本モデルは、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。基礎下部の固定については、地盤との拘束がほとんど生じないように、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。

4.2 乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数

乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数は、日本建築学会式¹⁾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、

●	コンクリート設計基準強度：27～36N/mm ²
●	鉄筋 主筋：SD345、せん断補強筋：SD295
●	主筋の鉄筋比 柱：約 0.6～1.4%、梁：約 1.2～2.8% 床：0.845%
●	せん断補強筋の鉄筋比 柱：約 0.5～1.0%、梁：約 0.4～1.1%

図-6 構造材料の諸元

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/m³ とした調合とし、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-2 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、0～1000×10⁻⁶ 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。

4.3 本研究における解析プロセス

図-9 に示すように、本研究では、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、クリープ

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が残留したままで、水平力による Pushover 解析を行った。ただし、今回の解析では、既報のような架構工程は考慮しなかった。

表-2 乾燥収縮ひずみ

解析番号	架設からの目標値 ($\times 10^{-6}$)	乾燥開始からの算定値 ($\times 10^{-6}$)	材齢 (日)	単位水量 (kg/m^3)
1	0	73	28	185
2	200	273	340	
3	400	473	1237	
4	600	674	4298	
5	800	880	19871	195
6	1000	1095	36363	215

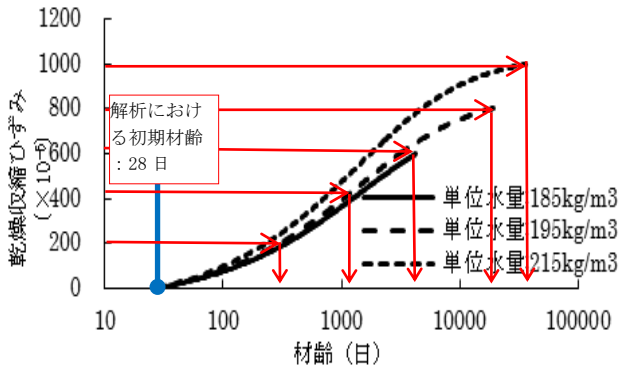


図-7 非線形解析での乾燥収縮ひずみの発生履歴

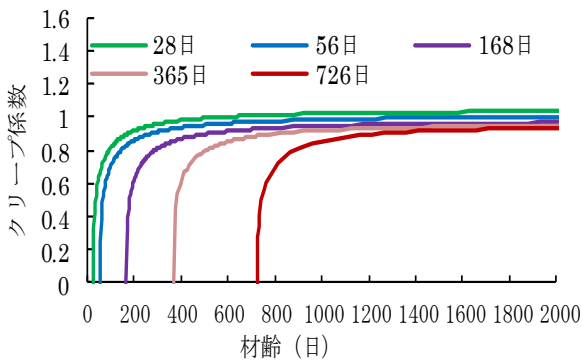


図-8 クリープ係数の履歴例

4.4 Pushover 解析と保有水平耐力

Pushover 解析は、各層の水平力を建築基準法における A_i 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

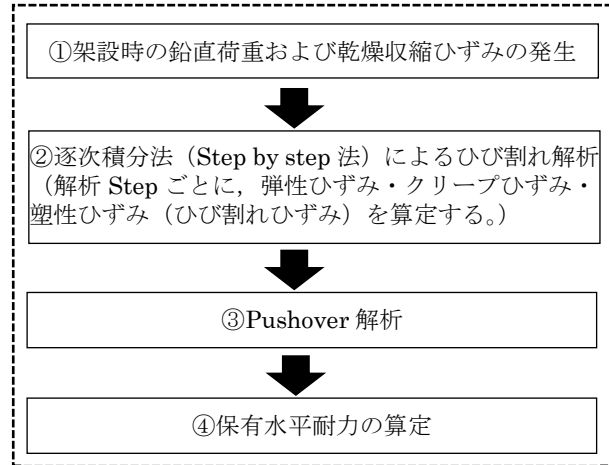


図-9 本研究における解析プロセス

デルの節点に作用させ、その各層の合計の比が A_i 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、限界変形角を $1/100$ として、最初にこの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。なお、Pushover 解析は、市販ソフト⁸⁾によっても比較用として無収縮モデルで実施した。

5. まとめ

本報告では、研究課題と解析概要の説明を行った。次報 (その 2. 解析結果) に続く。

[参考文献]

- 1) 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
- 2) Multi-Scale Modeling of Structural Concrete (2008), K. Maekawa, T. Ishida and T. Kishi, Taylor and Francis
- 3) 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, 2015, in CD-ROM
- 4) 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
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」, 2012
- 6) 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, 2014, in CD-ROM
- 7) 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
- 8) ユニオンシステム(株)：Super Build/SS3, 2015

*1 大阪市立大学 教授・工博
 *2 大阪市立大学大学院 修士課程
 *3 ソフトエボリューション株式会社