

自己歪が鉄筋コンクリート造建築物の構造性能に与える影響に関する研究  
その1. 3次元非線形構造解析用ソフトウェア「Soft-OCU」の開発

正会員 ○渡部 嗣道\* 富田 耕司\*\*  
正会員 張 殿宇\*\*\*

コンクリート 乾燥収縮 有限要素法  
逐次積分法 クリープ 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<sup>1)</sup>されるとともに、今日では材料学的方法によりひび割れのないコンクリートの技術開発なども行われている。しかし、乾燥収縮による引張応力やひび割れが建物全体の構造性能に及ぼす影響に関する研究は少なく、十分に解明されているとはいえない。そこで、著者らは時間依存性を考慮した有限要素法による3次元非線形構造解析用ソフトウェア「Soft-OCU」<sup>2)</sup>を開発したので、本研究ではそのソフトを適用して、乾燥収縮ひずみによる劣化が構造性能に与える影響を評価することを研究目的とした解析を実施した。

本報では、既往の研究と開発ソフトの概要を示す。

2. 既往の研究

乾燥収縮によるひび割れは、コンクリートが拘束され、引張応力が引張強度を上回る場合に生じるとされるが、その拘束は部材間の拘束によって生じるにも関わらず、これまでの乾燥収縮ひずみがひび割れに与える影響についての研究は、鉄筋に拘束された梁や柱、あるいはこれらに拘束された壁など、部材単体規模に限られるものが多く、構造物全体の部材間拘束によって柱・梁に作用する不静定応力を求めた研究は少ない。青山の研究<sup>3)</sup>では、熱応力や収縮などに起因するラーメン構造の自己ひずみ応力の算出法を提案し、応力算定を行っているが、時刻歴に変化する力学的特性やクリープひずみなどを逐次考慮したものではない。そこで、著者の一人は、鉄筋コンクリート構造物に乾燥収縮ひずみが生じる時の部材に作用する場合の応力を、市販の3次元有限要素法解析ソフトウェアを用いてフルモデルの弾性解析を行ったが<sup>4)</sup>、この解析法ではひび割れによる劣化の進展状況を評価できない。

一方、前川ら<sup>5)</sup>は、6層の集合住宅をモデル化した実大試験体で、乾燥収縮ひび割れの劣化を生じさせた場合の動的破壊実験で、ひび割れのないものよりも大きな変形を生じ、乾燥収縮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。この研究の他には、乾燥収縮ひずみあるいはそれによる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研究はほとんど見られない。そこで、著者らは前川らの研究を参考に、実大モデルを想定した静的非線形解析を行うこととした。

3. 解析ソフトの概要

有限要素法による3次元非線形構造解析用ソフトウェア「Soft OCU」の基本仕様を表-1に示す。自己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、耐震解析を行う機能を有するものとした。

表-1 基本仕様

項目	概要
1	自己ひずみによるひび割れ発生に伴う時間依存性の非線形解析を、クリープひずみの発生を含めた逐次積分法(Step by step法)で実施できる。
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	フルモデルなどの大容量モデルでも高精度処理が可能である。
4	FEM要素は鉄筋とコンクリートとの複合則で構成される。
5	長期的なひび割れ解析後から、耐震性を評価するための非線形解析が可能である。

(1) 自己ひずみによるひび割れ解析

図-1に乾燥収縮ひずみが生じた場合の弾性解析結果を示す<sup>6)</sup>。主に基礎梁によって上部構造物が拘束され、低層階に大きな引張応力が生じるが、弾性解析であるために、ひび割れ進展の状況は評価できない。そこで、ひび割れ進展をシミュレーションするには時間依存性の非線形解析を行う必要があり、長期的な性状を評価するにはこれと同時にクリープ解析も実施しなければならない。

そこで、開発ソフトでは、初期弾性応力に応じてクリープひずみを増分解析するとともに、この架構後に逐次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とクリープひずみも同様に逐次増分解析し、ひび割れが発生する場合には塑性ひずみの逐次増分解析も行えるようにした(非線形逐次増分解析(非線形 step-by-step法))。そこで、ひび割れ解析は、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 (ひび割れひずみ),  $\varepsilon_{cr}(t)$  : 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,  $E(t_i)$  : ヤング係数, とする。

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

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

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

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

図-2 に、開発プログラムを適用した各経過時間 (20年で約 700  $\mu$  の乾燥収縮ひずみ) におけるひび割れひずみ (3 方向の塑性ひずみのベクトルの絶対値) の経年劣化のシミュレーション例を示す<sup>6)</sup>。低層階の床スラブから徐々にひび割れが発生し、その後梁にも発生すると、経過年数とともに梁のひび割れが上層階にも進展する様子が見られる。

(2) 架設工程の考慮

施工工区あるいは工程ごとに連続して解析できるよう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することが可能である<sup>3)</sup>。

(3) 大容量モデルにおける高精度対応

本解析におけるソルバーは、「NEi-Nastran」を使用している。

(4) 耐震性評価

ひび割れ解析と静的非線形解析 (Pushover 解析) あるいは将来的に動的非線形解析とを連成し、ひび割れ劣化後の構造性能を評価することを可能とする。

4. まとめ

本報では、著者らが開発した逐次積分法による3次元非線形構造解析用ソフトウェア「Soft-OCU」の概要を報告した。次報では、解析計画を報告する。

[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) 大阪市立大学・ソフトエボリューション(株)製：「Soft OCU (FEM SOFTWARE ORIENTED TO CREEP AND

ELASTO-PLASTIC ANALYSIS FOR ULTIMATE PROPERTIES OF CONCRETE STRUCTURES)」, 2015

3) 青山博之：鉄筋コンクリート造建築物の自己歪応力に関する研究, 東京大学学位論文, 1952.12  
 4) 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  
 5) K. Maekawa, T. Ishida and T. Kishi, Multi-Scale Modeling of Structural Concrete (2008), Taylor and Francis  
 6) 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析, コンクリート年次論文報告集, Vol37, No.2, pp85-90, 2015

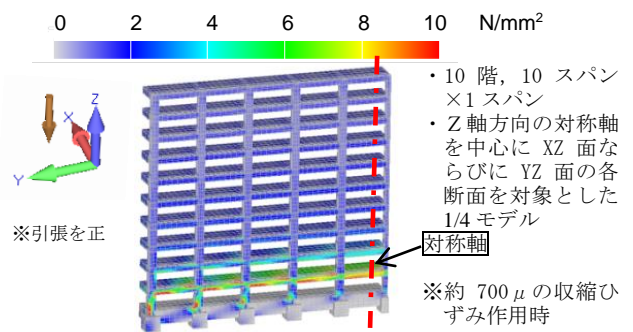


図-1 弾性解析結果 (最大主応力)<sup>6)</sup>

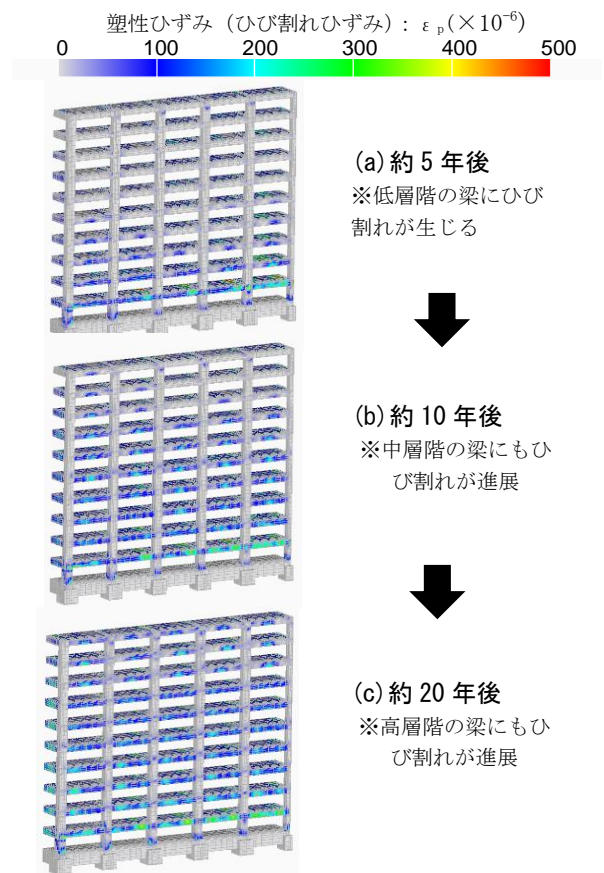


図-2 ひび割れによる経年劣化の進展<sup>6)</sup>

\*大阪市立大学大学院 生活科学研究科

\*\* (株)ソフトエボリューション \*\*\* (株)パウエンジニアリング

\* Osaka City Uni.

\*\* Soft Evolution Co.,Ltd., Bau Engineering Co.,Ltd.