

# ミクロ的観点に立脚したコンクリートの体積変化の数値的モデルと そのスケールアップによる適用性評価に関する研究

中央大学 学生会員 ○前田 千聡  
中央大学 正会員 大下 英吉

## 1. はじめに

コンクリートは、セメントと水の水和反応によって形成される多孔質材料であり、ゲル空隙内部には環境条件によって未反応水が存在する。コンクリート内の細孔は図-1 に示す場合、細孔壁とそれに挟まれた水滴からなり、細孔内の水がメニスカスを形成する。コンクリート内に湿度変化が生じると、メニスカスが変形し表面張力を起因とする応力状態も変化する。この変化により生じる硬化体の体積変化現象を乾燥収縮と呼び、コンクリートのひび割れの要因の一つとされている。したがって、乾燥収縮は耐久性をはじめとする構造物の諸性能に大きく影響し、体積変化を正確に予測することは重要である。現在、コンクリートのマクロな体積変化は高精度な測定装置を用いることで実測が可能であるが、珪酸カルシウム水和物(以下、C-S-H)のようなミクロな状態においては実測手段がなく、計算により予測する研究がなされている。

既往の研究<sup>1)</sup>ではコンクリート内部の湿度変化に応じて、実験式や細孔径分布を用いることで乾燥収縮を評価する手法が検討されている。しかしながら、この手法は図-2 に示すように、試料内の細孔構造を任意径ごとの集合構造、つまり空隙構造を平均化しており、実際の細孔構造とは異なる。したがって、本研究では連結する細孔の特性を考慮した乾燥収縮モデルを検討し、予測精度の向上を目的とした。

## 2. 空隙構造を考慮した乾燥収縮モデル

本研究では、図-1 に示すように空隙を2つの細孔壁からなる形と仮定し、空隙内の含水状態を空隙径ごとに扱う。この際に作用する表面張力による発生する応力状態を考慮し、相対湿度の変化に応じて乾燥収縮が生じる機構を考える。

相対湿度と毛管凝縮を起こす空隙径の関係式である Kelvin 式を式(1)に示す。

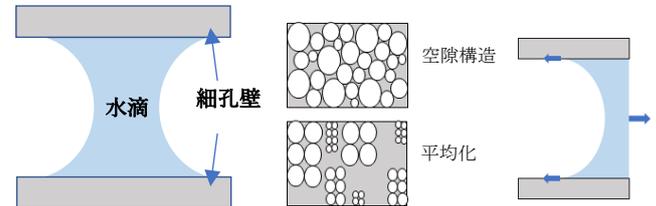


図-1 任意径の空隙図

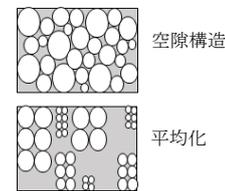


図-2 空隙構造

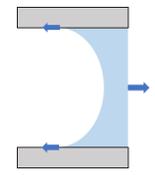


図-3 由体図

$$\ln(h) = -\frac{2\gamma V_m}{RT} \quad (1)$$

ここで、 $h$ : 相対湿度、 $\gamma$ (N/m): 水の表面張力、 $V_m$ ( $m^3/mol$ ): 水のもル体積、 $R$ ( $J/mol \cdot K$ ): 気体定数、 $T$ (K): 絶対温度である。相対湿度の変化により空隙内の水滴の形は変化するが、メニスカスが消失した場合に細孔壁面に吸着する水の吸着厚さ $t$ と相対湿度の関係は式(2)で表される。

$$t = -\frac{\gamma V_m}{RT \ln(h)} \quad (2)$$

空隙径 $r$ の空隙における飽和度 $S_r$ は空隙に水が満たされている割合として考え、式(3)に表す。

$$S_r = \frac{r^2 - (r - t)^2}{r^2} \quad (3)$$

表面張力による応力状態を考えるにあたり、図-3 のような自由体での力の釣り合いより得られる応力と飽和度 $S_r$ を用いることで任意径のひずみ $\epsilon_n$ は式(4)で表される。

$$\epsilon_n = \frac{S_r \gamma (\pi - 1)}{rK} \quad (4)$$

ここで、 $K$ ( $N/m^2$ ): 体積弾性係数である。

この機構に細孔径分布を用いて試料全体の収縮の評価を行ったものが既往の研究であるが、実際のコンクリート内部の空隙は、大きさの異なる細孔が複雑に連結することにより形成される。佐伯ら<sup>2)</sup>によると、空隙構造は3~10nmの径で構成される25nm程度のC-S-Hの凝集構造、10~20nm程のボトルネック空隙、21nm以上の粗大な空隙からなる構造単位が連結すると指摘し

キーワード C-S-H, 乾燥収縮, 細孔径分布, 空隙構造

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL: 03-3817-1711 E-mail: a18.7yh5@g.chuo-u.ac.jp

ている。そこで、**図-4**に示すような構造単位を考え、以下に示す計算式により試料全体のひずみを算出した。

構造単位内に任意の C-S-H 凝集構造が存在する確率  $P_{CSH}$  を式(5)に表す。

$$P_{CSH} = \frac{N(a) \times N(b) \times \dots \times N(n)}{N_0 P m} \quad (5)$$

ここで、 $m = \sum n \leq 25$ ,  $N_0$ : 全空隙数,  $N(n)$ : 凝集構造を構成する径である。同様にボトルネック空隙, 粗大な空隙存在する確率を  $P_b$ ,  $P_s$  として任意の構造単位が存在する確率  $P$  を式(6)に表す。

$$P = P_{CSH} \times P_b \times P_s \quad (6)$$

任意の構造単位が占める総体積  $V$  は、式(6)に試料内の全空隙量  $V_0$  を乗じることで次式のように表される。

$$V = V_0 P \quad (7)$$

試料内に存在する任意の構造単位の数  $N_t$  は式(8)で表される。

$$N_t = \frac{V}{V_t} \quad (8)$$

ここで、空隙は球体と仮定し、 $V_t$ : 構成径の体積和である。

1つの構造ユニットにおけるひずみを式(9)で表し、ユニット数及びすべての組合せにより得られる試料全体のひずみは式(10)により得られる。

$$\frac{1}{\varepsilon_t} = \sum \frac{1}{\varepsilon_n} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \sum N_t \varepsilon_t \quad (10)$$

### 3. 計算結果と本モデルの適用性

本モデルの適用性を評価するため、任意の相対湿度において実測値及び既往の理論値との比較を行った。計算における諸値は  $V_0: 0.1974(\text{m}^3/\text{m}^3)$ ,  $\gamma: 0.0728(\text{N}/\text{m})$ ,  $T: 293(\text{K})$ ,  $R: 8.31(\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K})$ ,  $V_m: 1.8 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{mol})$ ,  $E: 25 \times 10^9(\text{N}/\text{m}^2)$  とした。

モデルに適用する細孔径分布は下村ら<sup>3)</sup>による理論式を用いた。式(11), (12)

$$V_{(r)} = V_0 \{1 - \exp(-Br^c)\} \quad (11)$$

$$\frac{dV_{(r)}}{dr} = V_0 B C r^{c-1} \exp(-Br^c) \quad (12)$$

ここで、 $B$ ,  $C$ : 分布形状を決めるパラメータである。相対湿度 40~80%での比較結果を**図-5**に示す。

本モデルでの算出結果において、相対湿度 40%のひずみは実測値・既往の理論値と大きく異なっている。こ

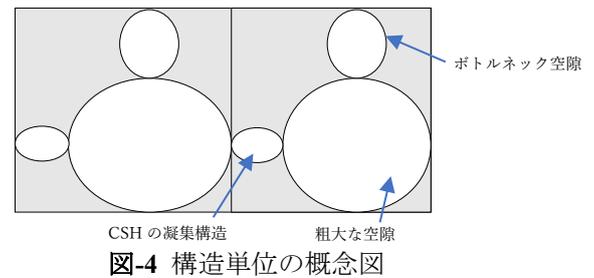


図-4 構造単位概念図

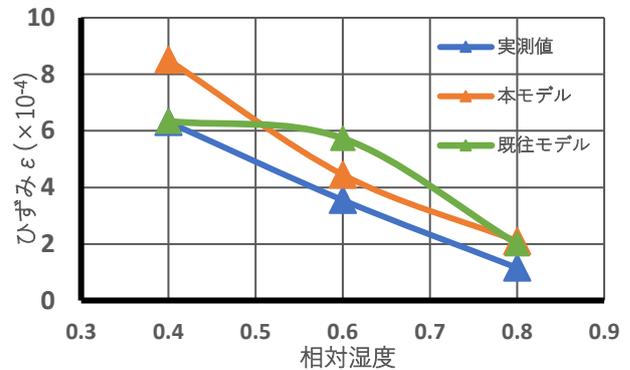


図-5 各相対湿度でのひずみ算定結果

の点について、任意径の空隙数は径が小さいほど多く、構造ユニットに入らない径によるひずみの影響を受けているためと考える。また、既往の理論値と比較すると、相対湿度 60%における精度は、本モデルが高く、相対湿度変化全体で評価した際、本モデルは実測値と類似した傾向を示すことが分かる。

### 4. まとめ

本研究では、コンクリートの細孔構造に基づく乾燥収縮モデルの構築を検討した。また、提案モデルによる体積変化の算定結果と、実測値及び既往の理論値との比較により、本モデルの適用性について検討した。

本モデルと実測値の傾向は類似しており、モデルの適用性が確認された。

### 5. 参考文献

- 1) 藤倉祐介, 後藤貴弘: 構成材料の空隙構造に基づくモルタル, コンクリートの乾燥収縮推定モデルの検討, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 3, 309-323, 2013.
- 2) 須藤俊幸, 佐伯竜彦, 齊藤豪: 空隙の連結性に着目したセメント系硬化体の空隙構造の評価, 土木学会論文集 E2, Vol. 73, No. 1, 82-92, 2017
- 3) 下村匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集 No.520/V-28, 35-45, 1995.8