

細孔構造に基づく乾燥収縮モデルの提案

著者	石川 雅美
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	53
号	1
ページ	17-24
発行年	2019-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00024021/

細孔構造に基づく乾燥収縮モデルの提案

Modelling drying shrinkage of concrete using the pore size distribution

石川 雅美*

Masami Ishikawa

Abstract: A drying shrinkage model for concrete is developed which is based on the pore size distribution. The model relates the drying shrinkage strain and the humidity within the concrete. Its incremental formulation will facilitate an implementation in a nonlinear finite element framework. The model uses a three-parameter function to approximate the cumulative pore size distributions and standard functions to describe the evolution in time of both the pore size distribution and the stiffness. The model results are in good agreement with experimental strains obtained from literature.

Keywords: Concrete, Drying shrinkage Pore size distribution

1 はじめに

本論文は、コンクリート工学年次論文集 Vol.39, 2017 年に掲載され、2017 年度日本コンクリート工学会東北支部論文賞を受賞したものであり、これに多少の解説を加えたものである。

コンクリートは、セメントと水との水和反応によって硬化するが、練り混ぜの際に加えられた水のすべてがセメントとの水和反応に費やされるわけではない。水和反応に費やされなかった水は、キャピラリー (Capillary) と呼ばれる、半径 10nm ~ 10,000nm 程度[1]の細孔に蓄えられる。この細孔に蓄えられた水がコンクリート内部を移動し、徐々に表面から逸散することによって、収縮の駆動力が生じる。

このように硬化したコンクリートは徐々に乾燥が進み、収縮する。それゆえコンクリート製の橋梁などでは、あらかじめ収縮によって橋梁全体の変形がどの程度になるかを見込んで設計を行っている。土木学会コンクリート標準示方書[2] (以下、示方書)では、設計で使用する乾燥収縮ひずみの予測

式を記載しているが、これは膨大な実験データを基に定められたものである。さらに、この乾燥に起因して生じる応力を乾燥収縮応力と呼び、これがコンクリートの引張強度を上回るとひび割れが生じることになる。コンクリートのひび割れ幅が一定以上の大きさになると、ひび割れからコンクリート内部に水が浸入し、鉄筋が腐食して構造物の安全性が損なわれる。これに対しては、有限要素法(線形代数をベースとした数値解析手法)といった数値解析により、複雑な計算を行ってひび割れ幅を予測し、対策を行っている。しかしながら、現状ではコンクリート内部の湿度変化に対応して生じる収縮ひずみの量を、実験式を基に求めており、解析精度の改善が望まれるところであった。

そこで、本研究では、有限要素法のプログラムに組み込むことを前提として、コンクリート内部の細孔構造に着目し、細孔内に生じる表面エネルギーをもとに乾燥収縮ひずみを計算するモデルを提案した。

2 提案モデルの考え方

一般にコンクリート中の細孔内部に存在する水が蒸発する際には、図-1 に示すように、

* 東北学院大学 工学部環境建設工学科 教授

水が細孔の壁どうしを接近させようとする引張力が作用すると言われている。この引張力は水の表面張力に起因しており、細孔の半径が小さいほど大きくなり、これが乾燥収縮を引き起こす一因と考えられている[3]。ある細孔内の水分が蒸発する際に生じる負圧 p は、細孔半径と水の表面張力 γ を基に式(1)に示すラプラス式より算出することができる。

$$p = \frac{2\gamma}{r} \quad (1)$$

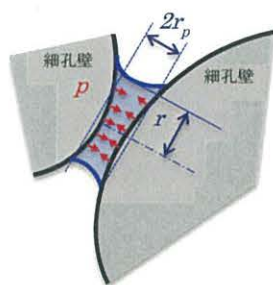


図-1 細孔内部の水と負圧 p

ここで、 γ : 水の表面張力、 r : メニスカス半径であり、例えば細孔中の水膜のように r_p が r に比べて十分に小さい時は細孔半径 r_p を上式の r とおいてよいとされている[4]。本研究において提案する、細孔径分布に基づく乾燥収縮モデルは、この式(1)を出発点とする。一方、式(2)として示す Kelvin 式では、相対湿度とメニスカス半径 r (以降は細孔半径 r_p をメニスカス半径 r と同量とみなし単に r とする) との関係が示されている。

$$\log\left(\frac{P}{P_0}\right) = -\frac{2\gamma M}{RT\rho r} \quad (2)$$

ここで、 P : 与えられた温度場での蒸気圧、 P_0 : 与えられた温度場における飽和蒸気圧、 γ : 水の表面張力で 0.00007252N/mm とする、 M : 水の分子量 18g/mol 、 R : 気体乗数、 ρ : 密度 (g/mm^3)、 T : 絶対温度 (K)。また P/P_0 は相対湿度 h であるので、式(2)は与えられた相対湿度に対して、その湿度において水分が蒸発する細孔の大きさを定めるものとして解釈できる。そこで本モデルでは、コンクリート内部の相対湿度 h に対して、水分が蒸発しうる細孔半径 r を式(2)により定める。図-2 に式(2)より求めた相対湿度と細孔半径の関係を示す。

ここで、Kelvin 式についてであるが、水については概ね 9nm 程度までの細孔に適用できることが実験によって確認されている[5]。しかしながら 10nm 以下の細孔については、一般にゲルポアとして分類されており¹⁾、式(1)に示す表面張力とは異なり、分離圧や層間水の移動といった収縮メカニズム[6]で論じられている。本研究では、 9nm 以下の細孔における厳密な収縮機構に立脚したモデルについては今後の課題とし、ここでは FEM により乾燥収縮応力を計算するための実用的なモデルを構築するとの観点から、 2nm 以上の細孔に対して Kelvin 式を適用することとした。

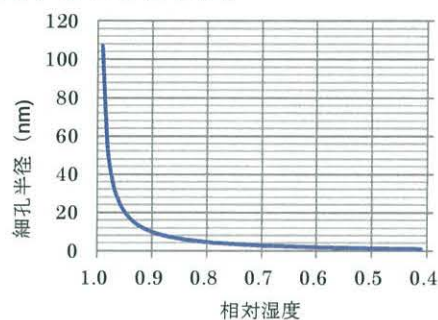


図-2 Kelvin 式による相対湿度と細孔半径の関係

本研究で提案するモデルの概念は以下の通りである。

- ・まず、コンクリート中の細孔径分布を仮定する。材齢に伴う細孔構造の変化についても考慮する。なお、細孔径分布と細孔容積の関係は試料 1g 当たりのものとする。
- ・細孔半径が $2\text{nm} \sim 2000\text{nm}$ の細孔が乾燥収縮に寄与するものとする。また、初期状態ではすべての細孔は水で満たされているものと仮定する。
- ・図-3 に示すように、ひとつひとつの細孔を球体と仮定し、細孔径分布ヒストグラムの各級間の細孔半径代表値 r_i とその細孔容積をもとに、各級間の細孔の数を算出する。
- ・与えられた相対湿度に対して式(2)より蒸発しうる細孔の半径を求め、その細孔中の水分が蒸発する際に生じる負圧 p を求める。これに球体と仮定した細孔の表面積を乗じてひとつの細孔内に作用する収縮力を求める。さらにこれに細孔の数をかけ、収縮力の総和を計算する。
- ・水分蒸発によって生じた細孔内に生じる収縮力の総和を、水分が蒸発した全ての細孔の表面

積で除して、細孔内の収縮応力を求める。さらに、この収縮応力を水分が蒸発したすべての細孔容積と試料 1g の容積との比率をもとに、試料全体のひずみに換算する。これを体積弾性係数 k_m で除して収縮ひずみを計算する。

以上の計算過程では、与えられた相対湿度の変化量(増分量)に対して、これに応じる収縮ひずみについても増分量で考える。すなわち、ある相対湿度 h から Δh だけ相対湿度が低下した場合、新たに蒸発を開始する細孔のみを対象として、そこに生じる負圧を計算する。このように増分量として扱うことにより、乾燥過程のみならず湿潤過程についても合理的に表すことが可能となる。

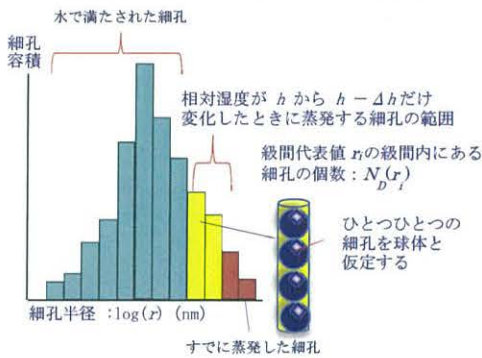


図-3 細孔径分布

3 細孔径分布の測定

3.1 コンクリートの配合および圧縮強度

水セメント比 45%, 50%および 55%とした 3 種類のコンクリートの細孔径分布を測定した。コンクリートの配合を表-1 に示す。いずれの配合とも単位水量は 160kg/m^3 一定とした。また、スランプは $8\text{cm} \pm 1\text{cm}$ 、空気量は $6\% \pm 0.5\%$ で管理した。なおセメントは高炉 B 種で、密度 3.04g/cm^3 、比表面積 $3720\text{cm}^2/\text{g}$ である。これら、3種類の配合のコンクリートに対して、JIS A 1108 に基づき、圧縮強度および静弾性係数を測定した。材齢に伴う圧縮強度の変化は示方書の式を用いた。すなわち、

$$f'_c(t') = \frac{t'}{a + b(t' - S_f)} f'_c(i) \quad (3)$$

ここで、 $f'_c(t')$: 有効材齢 t' 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 $f'_c(i)$: 基準材齢 i 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 i : 設計基準強度の基準材齢(日)、 a, b, S_f : セメントの種類および基準材齢に応じた定数、および硬化原点に対応する有効材齢(日)。圧縮強度と弾性係数 $E_c(t')$ の関係も示方書の式を用いた。

$$E_c(t') = 6300 \cdot f'_c(t')^{0.45} \quad (4)$$

図-4 に弾性係数の近似式と測定値を示す。図中のマーカーは実測値である。式(3)の強度パラメータは、示方書の解説表 5.1.1 より算出した。表-2 に圧縮強度および弾性係数の測定値とともに示方書式の値を示す。

表-2 圧縮強度および弾性係数

W/C (%)	圧縮強度 (N/mm^2), 弾性係数 (kN/mm^2 : カッコ内の値)			
	7 日	28 日	a	b
45	18.9 (22.3)	31.6 (30.5)	5.882	0.788
50	17.5 (22.5)	29.7 (30.65)	6.680	0.757
55	13.7 (20.9)	24.1 (29.85)	7.382	0.732

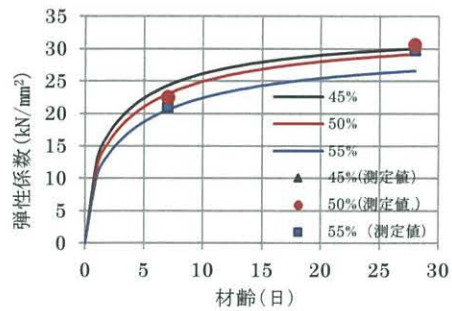


図-4 弾性係数の測定値と近似

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (実測) (cm)	空気量 (実測) (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)					
					セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G1	粗骨材 G2	AE 減水剤
20	9.0	6.3	45	41	356	160	699	636	424	6.25A
20	8.7	6.0	50	42	320	160	730	637	425	5A
20	9.0	6.3	55	43	291	160	756	634	423	8.5A

3.2 細孔径分布の測定結果

各細孔径分布の測定結果の一例として3種類の配合の細孔径分布を図-5 から図-7 に示す。また、これに対する式(5)による近似曲線を同図に示す。細孔径分布の測定は、材齢に伴う細孔構造の変化を確認するため、材齢7日と91日において行った。測定に供した試料を所定の材齢において水和反応を固定するためアセトンに浸し、水銀圧入法による測定を行った。なお、測定における細孔径の最小値は3.75nmであったが、近似曲線を用いることにより2nm~2000nmの範囲の細孔量を使用する。

$$V(r) = A \cdot e^{-B \log(r)} \quad (5)$$

ここで、 $V(r)$: 細孔半径 r 以上の細孔の累積容積(mm^3/g)、 r : 細孔半径(nm)、 A, B : 近似パラメータ。表-3に各配合に対する式(5)のパラメータの値を示す。

これらの図から累積細孔容積は材齢の経過とともに減少していることが分かる。図-5~7に示したように累積細孔容積は材齢に伴い変化する。本研究で提案するモデルは、細孔径分布を基にするため、材齢とともに変化する細孔構造を連続的に表す必要がある。そこで材齢7日と91日の間の任意材齢の累積細孔容積を、7日の累積細孔容積と91日の累積細孔容積を補間して求める。式(6)に示す材齢 t' における細孔容積の時間変化量 $\Delta V(r_i, t')$ は強度増加と関連すると仮定し、強度増加を表す式(4)と同様の関数を用いた式(7)により補間する。なお r_i は、前述したように細孔半径が $n - \Delta r/2 \sim n + \Delta r/2$ の範囲にある級間の代表値である。

表-3 近似式(5)のパラメータ

w/c (%)	7日		91日	
	A	B	A	B
45	155	0.85	78	0.52
50	158	0.82	80	0.70
55	162	0.80	90	0.80

$$V(r_i, t') = V(r_i, 7) - \Delta V(r_i, t') \quad (6)$$

$$\Delta V(r_i, t') = (V(r_i, 7) - V(r_i, 91)) \cdot \frac{\left(\frac{t'}{a+bt'} - \frac{7}{a+7b}\right)}{\left(\frac{91}{a+91b} - \frac{7}{a+7b}\right)}, \quad (7 \leq t' \leq 91) \quad (7)$$

ここで、 $V(r_i, t')$: 材齢 t' における半径 r_i の細孔容積、 $V(r_i, 7)$: 材齢7日における半径 r_i の細孔容積、 $V(r_i, 91)$: 材齢91日における半径 r_i の細孔容積、また a, b は式(3)の強度パラメータである。なお、後述するモデルの検証において、材齢7日以前の累積細孔容積については7日の値を用いるものとし、材齢91日以降については91日の値を用いることとした。図-8に水セメント比50%の場合の累積細孔容積の補間例を示す。

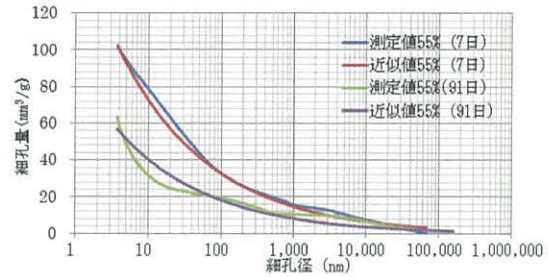


図-5 水セメント比55%の累積細孔容積

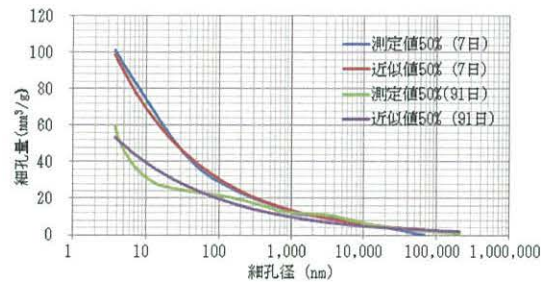


図-6 水セメント比50%の累積細孔容積

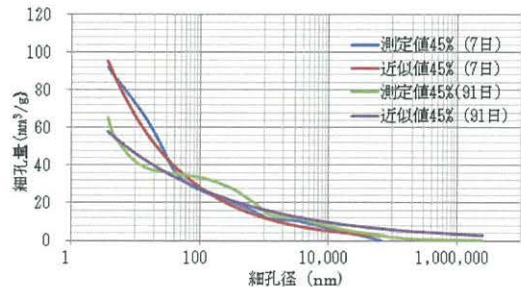


図-7 水セメント比45%の累積細孔容積

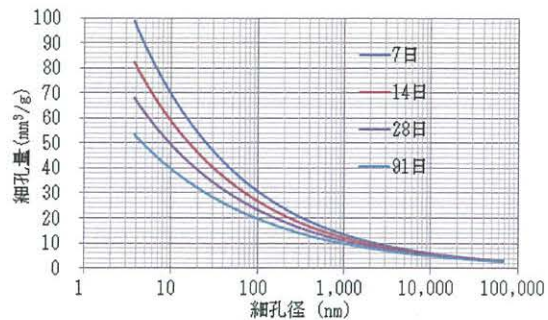


図-8 材齢に伴う累積細孔容積の変化

4 提案モデルの定式化

本モデルでは、累積細孔容積の近似曲線を図-9に示すように離散化して用いる。ここでは前述のように細孔の半径 2nm~2000nm の範囲を使用する。下限値を 2nm とした理由は、式(2)より相対湿度 60%において蒸発可能な細孔径が 2nm となることによる。したがって、本提案モデルの適用範囲はコンクリート内部の相対湿度を 60%以上とする。これ以下の湿度については今後の研究課題としたい。上限値を 2000nm としたのは、この値より大きい領域では、式(1)より計算される負圧が 0.1N/mm² 程度以下となり、乾燥収縮ひずみにほとんど寄与しないと判断したためである。この 2nm~2000nm の範囲を N_D 個の級間に分割する。なお各級間幅 Δr_i は対数値で等間隔となるように定める。

いま、コンクリート内部の相対湿度が h から Δh だけ低下した状態を考える。このとき、式(2)より、 h および $h + \Delta h$ の相対湿度において水分が蒸発する細孔半径 r^h 、 $r^{h+\Delta h}$ を求める。

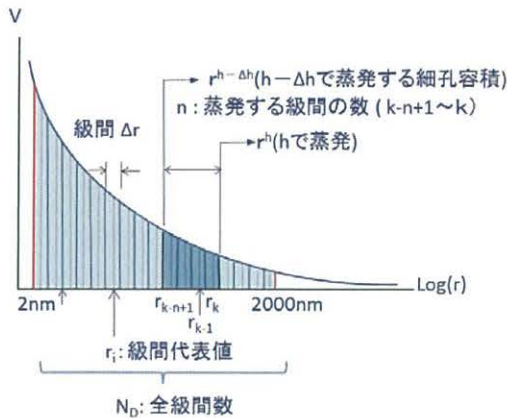


図-9 累積細孔容積の離散化

$$r^h = -\frac{2\gamma M}{RT\rho} \cdot \frac{1}{\log(h)}, \quad r^{h-\Delta h} = -\frac{2\gamma M}{RT\rho} \cdot \frac{1}{\log(h-\Delta h)} \quad (8)$$

この r^h と $r^{h-\Delta h}$ の間に $r_k, r_{k-1}, r_{k-2}, \dots, r_{k-n+1}$ を代表値とする n 個の級間があるとすると、それらの級間ごとの細孔容積 $v(r_k, t')$, $v(r_{k-1}, t')$, $\dots, v(r_{k-n+1}, t')$ は、累積細孔容積の近似曲線から求められる。たとえば、 k 番目の級間代表値 r_k の級間に属する細孔の体積 $v(r_k, t')$ は式(5)の近似式から

$$v(r_k, t') = V(r_k - \Delta r_k / 2, t') - V(r_k + \Delta r_k / 2, t') \quad (9)$$

で求められる。

細孔を球体と仮定して各級間の細孔の数 $N(r_i, t')$ は次式から計算できる。

$$N(r_i, t') = \frac{v(r_i, t')}{4\pi r_i^3 / 3} \quad (10)$$

ここで、細孔半径 r_i の細孔内部に作用する負圧 p_i は、式(1)をもとに

$$p(r_i) = \eta \frac{2\gamma}{r_i} \quad (11)$$

となる。ここで η は、湿潤過程における非回復分を考慮するパラメータであり、乾燥過程においては 1 とする。一方、湿潤過程においては η の符号を反転させることで細孔内が正圧となり、湿潤膨張を合理的に表現することが可能となる。

$N(r_i, t')$ 個の細孔半径 r_i に作用する負圧 $p(r_i)$ による力の総和を $\Delta F_{sh}(t')$ は、

$$\Delta F_{sh}(t') = \sum_{i=k}^{k-n+1} N(r_i, t') \cdot p(r_i) \cdot (4\pi r_i^2) \quad (12)$$

であり、これをその時点までに水分が蒸発したすべての細孔の面積で除して、水分が蒸発した細孔全体に作用する収縮力 $\Delta \sigma_{sh}(t')$ に換算する。ここでは、水で満たされた細孔は変形しないものと仮定し、式(13)の分母には含まれない。

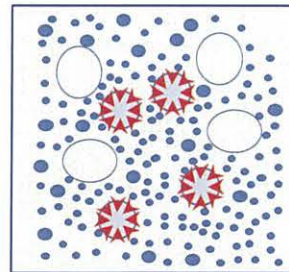


図-10 水分の蒸発により負圧が生じる細孔

例えば、図-10 に模式的にコンクリート内部の細細孔を示す。ここで、水色で塗りつぶされた細孔は水分で満たされており、中抜きと比較的大きな細孔は、すでに水分が蒸発したもの、赤の内向きの矢印の細孔は水分の蒸発により負圧が生じているものとする(この場合、負圧が生じる細孔は 4 つあるので、 $N(r_i, t')=4$)。式(12)は、この場合 4 つの細孔に生じた負圧に細孔内部の表面積をかけて合計した力を求めている。

$$\Delta\sigma_{sh}^p(t') = \frac{\Delta F_{sh}(t')}{\sum_{i=k-n+1}^{N_T} N(r_i, t') 4\pi r_i^2} \quad (13)$$

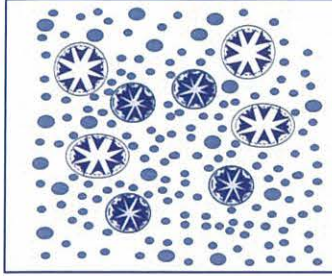


図-11 (13)式の分母となる細孔

図-11 に、(13)式の分母である負圧の受け持つ細孔を示す。すなわち、図-10 に示した赤色の矢印の細孔だけでなく、すでに水分が蒸発した中抜きで示した比較的大きな細孔も負圧を受け持つと考える。

さらに、水分が蒸発した細孔全体に作用する応力 $\Delta\sigma_{sh}^p(t')$ を資料全体の応力 $\Delta\sigma_{sh}(t')$ に換算する。

$$\Delta\sigma_{sh}(t') = \frac{V_p(t')\Delta\sigma_{sh}^p(t') + (V_m - V_p(t'))\Delta\sigma^m(t')}{V_m} \quad (14)$$

ここで $V_p(t')$ は水分が蒸発した細孔の体積、 V_m は資料 1g の体積、 $\Delta\sigma^m(t')$ はモルタルまたはコンクリート部の初期応力であるが、ここではゼロとする。ゆえに式(14)は、

$$\Delta\sigma_{sh}(t') = \frac{V_p(t')\Delta\sigma_{sh}^p(t')}{V_m} \quad (15)$$

となり、これをモルタルまたはコンクリートの体積弾性係数 $K_m(t')$ で除することにより、最終的に乾燥収縮ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{sh}(t')$ が得られる。

$$\Delta\varepsilon_{sh}(t') = \frac{\Delta\sigma_{sh}(t')}{K_m(t')} \quad (16)$$

5 提案モデルの評価

5.1 湿度履歴の仮定

本提案モデルの評価にあたって湿度履歴を仮定する目的で JCMAC3 (日本コンクリート工学会製マスコンクリートの温度応力解析用 FEM プログ

ラム) により湿気移動解析を行った。解析モデルは図-12 に示す $100 \times 100 \times 400$ の角柱試験体を 7 日間水中養生したのち、相対湿度 60%、温度 20°C の環境に置いたと仮定した。解析に用いた湿度物性はすべて JCMAC3 のデフォルト値である。図-13 は、この解析結果より作成した断面の平均の湿度履歴である。

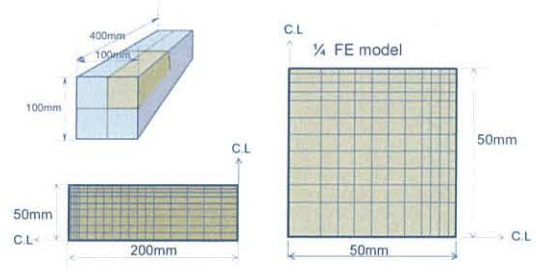


図-12 湿気移動解析に用いた解析モデル

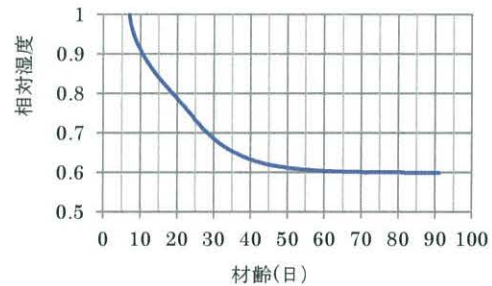


図-13 解析結果より仮定した断面の平均の湿度履歴

5.2 モデルによる乾燥収縮ひずみの計算例

図-14 は図-13 の湿度履歴を用いて、本モデルにより算出した乾燥収縮ひずみの履歴である。ここでは 3 章で示した材齢に伴う累積細孔容積および弾性係数の変化を考慮した値を用いている。この図で、水セメント比の違いによる乾燥収縮ひずみの差は、主に式(5)および表-3 で記述される細孔構造の違いによるものである。

図-15 は、相対湿度と収縮ひずみの関係である。ここでも材齢に伴う累積細孔容積の変化および弾性係数の変化を考慮している。この図から相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係は、ほぼ直線となることが示された。

図-16 は、弾性係数を一定とした場合の計算結果である。弾性係数の値は、表-2 に示す材齢 28

日の値とした。また、細孔構造についても材齢による変化はないものとし、材齢 91 日のものを用いている。このケースは十分に硬化したコンクリートを想定したものである。硬化したコンクリートでは、相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係は、硬化過程にあるものと比較すると若干の非線形性を呈している。本提案モデルではコンクリートの弾性係数および細孔構造が時間的に変化しない場合、出力されるひずみは時間の関数にはならず、温度場における線膨張係数のような役割となる。ここではさらに、湿度が 60% に達した後の湿潤過程についても示した。湿度が 60% に達した以降の湿度履歴は、図-13 に示した履歴の乾燥過程と同じ形で 100% まで戻している。なお、式(11)に示す湿潤過程のパラメータ η の値は 0.5 である。この図から、湿潤過程においても合理的に合わさることが示された。ただし、 η の厳密な値については今後の研究によって確定されることを期待したい。

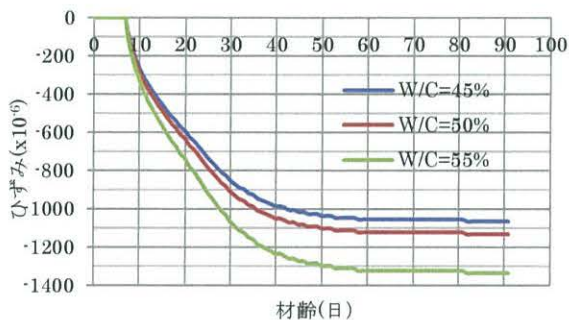


図-14 図-13の湿度履歴に対応した乾燥収縮ひずみ

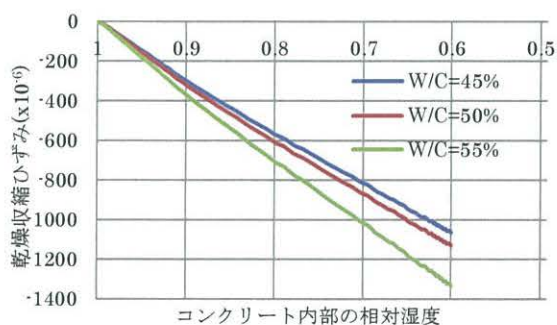


図-15 相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係

図-17 に Q. Wu[7]らの水セメント比 50%の試験結果および綾野ら[8]の提案式(17)との比較を示す。なお、図中の計算結果は図-13 に示したグラフである。Q. Wuらは、厚さ 3mm 程度の非常に薄いモルタル片のひずみと周辺相対湿度との

関係を実験により求めている。ここでは、周辺相対湿度とモルタル片の湿度をほぼ同程度とみなしている。また、綾野らは実験結果に基づき、水セメント比 50%のモルタルの材齢 t 日における相対湿度 h に対する収縮ひずみ $\epsilon_{sh}(h)$ を次式として提案している。

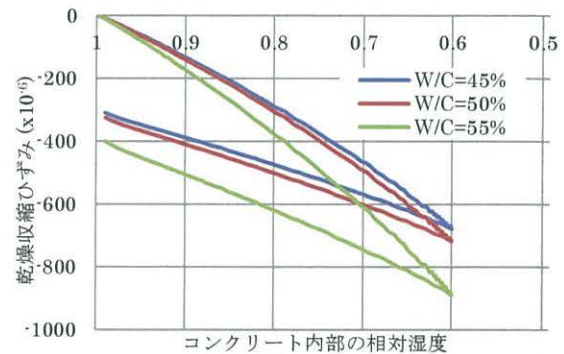


図-16 弾性係数と細孔構造を一定とした場合の相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係

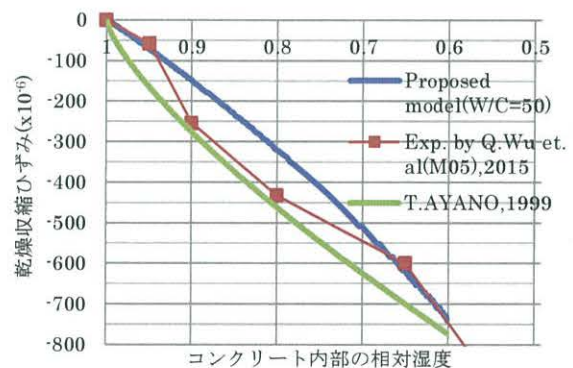


図-17 既往の実験による測定結果との比較

6 まとめ

コンクリートの細孔構造に基づく乾燥収縮モデルを提案した。本モデルは、FEM に組み込むことを目的としており、与えられるコンクリート内部の相対湿度の変化量に対して乾燥収縮ひずみの増分量を出力するものである。硬化過程においては、弾性係数の変化と細孔構造の変化をそれぞれ独立して考慮することができる。一方、硬化したコンクリートについては、乾燥収縮ひずみは時間の関数にはならず、相対湿度のみの関数となる。

本モデルにより求めたコンクリート内部の相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係はほぼ直線関係となり、既往の実験結果とも同様の傾向を示すことが確認された。

参考文献

- [1] S. Mindess, JF. Young, D. Darwin :
“Concrete”, Second Edition, Prentice Hall,
2003
- [2] 土木学会:2012 年制定コンクリート標準示方
書 設計編, 2013.3
- [3] T. Shimomura, K. Maekawa: “Analysis of
drying shrinkage behavior of concrete using
a micromechanical model based on the
micropore structure of concrete”, Magazine of
Concrete Research, 49(181), pp.303-322,1997
- [4] ドウジエンヌ, プロシヤール・ヴィアール, ケレ:”
表面張力の物理学”, 吉岡出版, 2003
- [5] L.R.Fisher,R.A.Gamble &
J.Middlehurst: ”The Kelvin equation and
the capillary condensation of water”, Nature
vol.290, 16, April 1981
- [6] 川村満紀ほか:”コンクリートの材料科学”, 森
北出版, 2002
- [7] Q. Wu, T. Rougelot, N. Burlion and X.
Bourbon: “Experimental study of the water
desorption and drying shrinkage of
cement-based materials with thin slices”,
CONCREEP 10, Mechanics and Physics of
Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete
and Concrete Structures, Concreep 10,
pp.1099-1108,2015
- [8] T. Ayano, K. Sakata and FH. Wittmann,:
Moisture distribution, diffusion coefficient
and shrinkage of cement-based materials,
Journal of JSCE, 45(634), pp.387-401,1999