

屋外環境下におけるコンクリートの  
長期乾燥収縮挙動の予測に関する検討

蓑輪 圭祐



# 屋外環境下におけるコンクリートの長期乾燥収縮挙動の予測に関する検討

## 目次

第 1 章 序論 .....	1
1.1 本研究の背景と目的 .....	1
1.2 本研究に関連する既往の研究および本研究の方法 .....	2
1.2.1 コンクリート中の水分移動に関する研究 .....	2
1.2.2 コンクリートの乾燥収縮モデルに関する研究 .....	4
1.2.3 屋外環境下における乾燥収縮ひずみの予測に関する研究 .....	6
1.2.4 有効部材厚 .....	6
1.2.5 乾燥収縮予測式 .....	8
1.2.6 本研究の方法 .....	8
1.3 本論文の構成 .....	9
第 1 章の参考文献 .....	10
第 2 章 屋外の環境作用がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する 全国共通暴露実験による検討 .....	12
2.1 はじめに .....	12
2.2 実験の概要 .....	12
2.2.1 暴露試験実施地点および気象データ .....	12
2.2.2 試験体の作製 .....	14
2.2.3 屋外暴露実験方法 .....	15
2.3 実験結果および考察 .....	16
2.3.1 水分量の変化 .....	16
2.3.2 収縮ひずみの変化 .....	17
2.4 第 2 章のまとめ .....	18
第 2 章の参考文献 .....	19

第 3 章 屋外の環境作用を考慮した水分移動および収縮ひずみ解析による 検討 .....	20
3.1 はじめに .....	20
3.2 水分移動に及ぼす各環境作用の影響の考慮方法 .....	21
3.2.1 湿度の影響 .....	21
3.2.2 外気温および日射の影響 .....	22
3.2.3 降雨および降雪の影響 .....	22
3.3 収縮ひずみ解析 .....	23
3.4 数値シミュレーションによる実験結果の再現 .....	23
3.5 第 3 章のまとめ .....	26
第 3 章の参考文献 .....	27
第 4 章 部材断面の寸法および形状がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影 響に関する検討 .....	28
4.1 はじめに .....	28
4.2 部材寸法が水分移動に及ぼす影響に関する実験 .....	28
4.2.1 実験の概要 .....	28
4.2.2 実験結果と数値解析の比較による考察 .....	29
4.3 部材寸法が乾燥収縮挙動に及ぼす影響の検討 .....	30
4.3.1 実験の概要 .....	30
4.3.2 実験結果と数値解析の比較による考察 .....	31
4.3.3 寸法が乾燥収縮挙動に与える影響に関する数値実験 .....	36
4.4 部材の形状が乾燥収縮挙動に及ぼす影響の検討 .....	39
4.4.1 数値実験の概要 .....	39
4.4.2 数値解析結果および考察 .....	40
4.5 乾燥収縮予測における有効部材厚の適用性に関する解析的検討 .....	42
4.5.1 検討内容の概要 .....	42
4.5.2 数値解析結果および考察 .....	42
4.6 第 4 章のまとめ .....	45
第 4 章の参考文献 .....	46

第 5 章 屋外における各環境作用がコンクリートの乾燥収縮挙動に及ぼす影響に関する数値実験 .....	47
5.1 はじめに .....	47
5.2 各環境作用が乾燥収縮に及ぼす影響に関する感度解析 .....	47
5.2.1 日射の影響 .....	47
5.2.2 降雨の影響 .....	48
5.3 湿度の時間変動が収縮に及ぼす影響に関する検討 .....	49
5.3.1 湿度の時間変動を考慮した場合の結果と一致する一定湿度の同定 .....	49
5.3.2 コンクリートの水分平衡特性の非線形性の観点からの検討 .....	52
5.3.3 湿度変動の影響を考慮する係数の定式化 .....	56
5.5 第 5 章のまとめ .....	58
第 5 章の参考文献 .....	59
第 6 章 乾燥収縮予測式を用いて屋外環境下のコンクリート部材の乾燥収縮挙動を予測する手法の提案 .....	60
6.1 はじめに .....	60
6.2 恒温恒湿環境下における収縮試験の結果と予測式との比較 .....	60
6.3 環境作用の影響を考慮する係数の導入による実験結果の再現 .....	61
6.3.1 湿度の時間変動の影響を考慮する係数 .....	61
6.3.2 降雨の影響を考慮する係数 .....	62
6.4 部材寸法が収縮ひずみの最大値に与える影響に関する検討 .....	65
6.5 第 6 章のまとめ .....	67
第 6 章の参考文献 .....	68
第 7 章 結論 .....	69
謝辞 .....	71

## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景と目的

乾燥収縮は、コンクリート中の水分が外部へ逸散することによって生じる体積変化である。この現象は、コンクリート内の湿度が外部の相対湿度と平衡状態に達するまで進行するため、収束するまでに数十年という長い時間を要する。そのため、コンクリート構造物に生じる最終的な収縮ひずみを実測によって把握することは極めて困難である。

乾燥収縮がコンクリート構造物にもたらす影響としては、部材の外的拘束および内的拘束によるひび割れの発生が代表的である。ひび割れの発生は、構造物の美観を損ない、遮蔽性を低下させる。また、塩分や水分などといった腐食物質の鋼材への到達を容易にすることにより、コンクリート構造物の耐久性を著しく低下させる場合もある。ひび割れが発生しない場合においても、コンクリートの収縮に起因した構造物の変形が使用性などの諸機能を低下させることになる。また、プレストレストコンクリート構造においては、乾燥収縮によって有効プレストレスが減少するため、長期供用性を低下させる場合がある。

このように、乾燥収縮が与える影響は直ちに構造物の安全性を脅かすものではないが、構造物の諸性能と深く関わっており、その多くが性能を低下させる方向に作用する。そのため、構造物中に使用したコンクリートがどの程度収縮するのか、収束するまでにどの程度の時間を要するのかを精緻に把握し、構造物の設計において考慮することが求められる。

コンクリートの収縮は、配合のほかにも、使用した骨材やセメントの種類、養生条件、構造物周辺の環境条件、部材断面の寸法やその形状など、様々な要因によってその程度が異なることが知られている。コンクリート作製に用いた材料やその配合に関しては、粗骨材の物性が乾燥収縮に大きく影響することが近年明らかになっており[1.1]、砕屑岩に分類される硬質砂岩の一部はコンクリートの乾燥収縮ひずみを増大させる傾向があるとの知見もある[1.2]。また、単位水量が大きく、水セメント比が大きいものほど収縮量が増大する傾向にある。部材寸法の影響については、寸法が大きなものほど収縮の進行が遅くなることが知られており、これまで数多くの研究がなされている[1.3][1.4][1.5][1.6][1.7][1.8]。また、寸法の長大化によって水和反応によって生じた熱が養生中におけるコンクリートの温度上昇に寄与し、その結果、養生中の温度が高いほど、乾燥収縮ひずみの最終値は小さくなるという報告もある[1.9]。

構造物周辺の環境条件については、屋外における環境作用の影響を適切に考慮することが求められる。一般的な屋外環境下は気温や湿度が常に変動しており、コンクリート表面では乾燥だけでなく吸湿も生じる。さらに日射による乾燥の促進や降雨による吸水も起こるため、これらによるコンクリートの含水状態の変化が乾燥収縮に影響する。それぞれの環境作用が収縮に及ぼす影響の定量的な関係については明らかにされておらず、さらなる検討が必要であるといえる。

以上のように、コンクリートの乾燥収縮はさまざまな影響因子が複合的に作用して生じている現象である。本論文では、これまで列挙した乾燥収縮に関する影響因子のうち、外部環境作用の影響および部材の寸法と形状に主眼を置くものである。

## 1.2 本研究に関連する既往の研究および本研究の方法

### 1.2.1 コンクリート中の水分移動に関する研究

コンクリートの水分移動は、表面が大気に接することで生じる乾燥・吸湿と、表面に液状水が接触することで生じる吸水に大別される。これらの現象が、これまで多くの研究者によって検討がなされている[1.10][1.11][1.12][1.13].

コンクリートは多孔質材料であり、多孔質体中の水分移動は細孔中の水蒸気の移動と液状水の移動がある。この2つを同一の拡散現象で取り扱う場合は、水分移動に関する拡散係数がコンクリートの含水状態によって異なるという特徴をもつ。さらに、コンクリート中の水分量を増加させる現象である吸湿および吸水のメカニズムには明確な違いがあることが知られている[1.14].

既往の研究の蓄積により、先述した水分移動特性を有するコンクリートの乾燥・吸湿および吸水は、コンクリート表面における境界条件を適切に考慮することで再現可能である。そのため、本研究では提案されている従来の水分移動モデルを用いて、屋外の環境作用を境界条件によって考慮し、環境作用がコンクリートの含水状態の変化に与える影響について検討する。

本研究で用いるコンクリート中の水分移動のモデルの概要を以下に示す[1.15][1.16][1.17][1.18].

下村は、式(1.1)で表される毛管凝縮理論および式(1.2)で表される細孔容積分布モデルによりコンクリート中の水分平衡特性を表現した。このモデルでは、式(1.1)で表される細孔半径よりも小さい細孔は乾湿の経路によらず全て液状水で満たされているとしている。そのため、式(1.2)より平衡時の液状水量は式(1.3)で表される。

$$r_s = -\frac{2\gamma M_w}{RT\rho_L} \left( \ln \frac{p_v}{p_{v0}} \right)^{-1} \quad (1.1)$$

$$V(r) = V_0 \{1 - \exp(-Br^c)\} \quad (1.2)$$

$$w_L = \rho_L V_0 \{1 - \exp(-Br_s^c)\} \quad (1.3)$$

ここに、 $r_s$ ：液状水が存在する最大細孔半径 [m]

$p_v$ ：水蒸気分圧 [Pa]

$p_{v0}$ ：飽和水蒸気圧 [Pa]

$\gamma$ ：液体の表面張力 [N/m]

$M_w$ ：水の分子量 [kg/mol]

$R$ ：気体定数 [J/(mol · K)]

$T$ ：温度 [K]

$\rho_L$ ：液状水の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$V(r)$ ：コンクリート単位体積中における細孔半径が  $r$  以下の累積細孔容積 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$r$  : 細孔半径 [m]

$V_0$  : コンクリート単位体積中における総細孔容積 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

$B$  : 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ

$C$  : 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ

$w_L$  : コンクリート単位体積中に存在する液状水の質量 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

である.

式(1.2)で表される細孔容積分布モデルに立脚した水分移動モデルが構築されている. そのモデルでは, コンクリート中の水分移動を水蒸気と液状水のそれぞれで考慮している. 水分移動における質量保存則は式(1.4)で表される.

水蒸気の移動は細孔内の分子拡散であるとし, 移動流束は式(1.5)で表される. 液状水の移動は毛管力の勾配を駆動力とした層流であると考え, 移動流束を式(1.6)で表している.

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -\text{div}(J_V + J_L) \quad (1.4)$$

$$J_V = -K_V V_G D_{V0} \text{grad} \rho_V \quad (1.5)$$

$$J_L = \int_0^{r_s} \left[ \rho_L \frac{dV(r)}{dr} \left\{ -K_L \frac{r^2}{8\mu} \text{grad} \left( -\frac{2\gamma}{r_s} \right) \right\} \right] dr \quad (1.6)$$

ここに,  $t$  : 時間 [s]

$J_V$  : 水蒸気の質量流束 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$J_L$  : 液状水の質量流束 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$K_V$  : 水蒸気移動に関する特性を表す材料係数

$V_G$  : コンクリート単位体積中における気相の体積 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

$D_{V0}$  : 水蒸気と乾燥空気の相互拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$K_L$  : 液状水移動に関する特性を表す材料係数

$\mu$  : 液状水の粘性係数 [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]

である.

西は, 毛管吸水現象と式(1.2)で表される細孔容積分布モデルによりコンクリート表面における吸水を表現している. コンクリート中の細孔を円形の毛管とみなし, 毛管力を駆動力とする吸水浸透現象を考える. コンクリートの細孔径が小さく液状水の質量が小さいことから重力の影響を無視できるとし, 毛管内の流れが完全な層流であると仮定した場合, 吸水時間  $t$  において半径  $r$  の毛管中に浸入する表面からの距離  $x$  は式(1.7)で表される. 表面からの距離  $x$ , 吸水時間  $t$  において距離  $x$  以上浸透する毛管の最小半径  $r_a$  を式(1.8)によって算出し, 最小半径より大きい細孔はすべて液状水で満たされているとすることで, コンクリート中に浸透した液状水量は式(1.9)で表される.

$$x = K_{LP} \sqrt{\frac{r\gamma \cos \theta}{2\mu} t} \quad (1.7)$$



$$r_a = \frac{2\mu}{\gamma t \cos \theta} \left( \frac{x}{K_{LP}} \right)^2 \quad (1.8)$$

$$w_{LP} = \rho_L V_0 \exp(-Br_a^c) \quad (1.9)$$

ここに、 $K_{LP}$ ：毛管吸水の移動に関する特性を表す材料係数

$\theta$ ：液状水の接触角 [°]

$w_{LP}$ ：コンクリート単位体積中に浸透した液状水の質量 [kg/m<sup>3</sup>]

$J_L$ ：液状水の質量流束 [kg/(m<sup>2</sup> · s)]

$K_V$ ：水蒸気移動に関する特性を表す材料係数

$V_G$ ：コンクリート単位体積中における気相の体積 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

である。

### 1.2.2 コンクリートの乾燥収縮モデルに関する研究

コンクリートの乾燥収縮は水分量の変化に伴って生じる現象であるため、1.2.1 項で述べた水分移動モデルに基づいて断面内の水分分布を求め、収縮ひずみを計算する。このとき、コンクリート部材中では、コンクリート中のセメントペーストに水分量の断面内分布に起因する乾燥収縮の内部拘束応力と、セメントペーストの乾燥収縮が近傍の骨材に拘束されることによる応力の2つの成分が複合的に作用する。そのため、小幡らは乾燥収縮によって生じる応力を合理的に評価するために、骨材-ペーストの複合構成モデルを提案している[1.19]。

本研究で用いるコンクリート中の乾燥収縮のモデルの概要を以下に示す。

コンクリートが均質である場合、種々の空隙を含む硬化セメントペースト中に細骨材と粗骨材がランダムに分布していると考えられる。簡単のため、粗骨材と細骨材の区別はせず、コンクリートをセメントペーストと骨材によって構成されているとすれば、式(1.10)が成り立つ。また、骨材とセメントペーストの複合形態を直列と並列の組み合わせにより表現した場合、式(1.11)が成り立つ。骨材は並列部分に含まれるとすれば、並列部分のペーストの体積および直列部分のペーストの体積は式(1.12)、式(1.13)で表される。

$$V_{cp} + V_{ag} = 1 \quad (1.10)$$

$$V_p + V_s = 1 \quad (1.11)$$

$$V_{cpp} = V_p - V_{ag} \quad (1.12)$$

$$V_{cps} = V_s \quad (1.13)$$

ここに、 $V_{cp}$ ：コンクリート単位体積中におけるセメントペーストの体積 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$V_{ag}$ ：コンクリート単位体積中における骨材の体積 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$V_p$ ：コンクリート単位体積中における並列部分が占める体積 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$V_s$ ：コンクリート単位体積中における直列部分が占める体積 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$V_{cpp}$ ：並列部分のセメントペーストの体積 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$V_{cps}$ ：直列部分のセメントペーストの体積 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

である。

次に、変形の適合条件について、並列部分のコンクリートのひずみ、並列部分のペーストのひずみ、骨材のひずみは一致するため、式(1.14)が成り立つ。また、コンクリート要素全体のひずみは、並列部分のコンクリートのひずみと直列部分のコンクリートのひずみを用いて式(1.15)で表される。

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{ag} = \varepsilon_{cpp} \quad (1.14)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_p V_p + \varepsilon_s V_s \quad (1.15)$$

ここに、 $\varepsilon_p$ ：並列部分のコンクリートのひずみ

$\varepsilon_{ag}$ ：骨材のひずみ

$\varepsilon_{cpp}$ ：並列部分のペーストのひずみ

$\varepsilon_c$ ：コンクリート要素全体のひずみ

$\varepsilon_s$ ：直列部分のコンクリートのひずみ

である。

応力のつり合い条件については、直列部分のペーストの応力はコンクリート要素全体の応力に等しいため、式(1.16)が成り立つ。並列部分ではセメントペーストと骨材がそれぞれの体積の割合に応じて応力を分担すると考えれば、式(1.17)で表される。

$$\sigma_c = \sigma_{cps} \quad (1.16)$$

$$\sigma_c = \frac{V_{ps}}{V_p} \sigma_{cpp} + \frac{V_{ag}}{V_p} \sigma_{ag} \quad (1.17)$$

ここに、 $\sigma_c$ ：コンクリート要素全体の応力 [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_{cps}$ ：直列部分のペーストの応力 [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_{cpp}$ ：並列部分のペーストの応力 [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_{ag}$ ：骨材の応力 [N/mm<sup>2</sup>]

である。

骨材の応力-ひずみ関係については、完全弾性体として取り扱うこととし、式(1.18)で表される。なお、乾燥収縮を考慮すると、セメントペーストの有効ひずみは式(1.19)で表される。セメントペーストの応力-ひずみ関係は、式(1.20)に示す弾性およびひずみ軟化型を用いており、微視的なひび割れが発生した以降であっても平均的には引張応力を負担するモデルとなっている。これらを直列部分および並列部分のペーストにそれぞれ適用している。

$$\sigma_{ag} = E_{ag}\varepsilon_{ag} \quad (1.18)$$

$$\varepsilon_{cpe} = \varepsilon_{cp} - \varepsilon_{cpsh} \quad (1.19)$$

$$\sigma_{cp} = \begin{cases} E_{cp0}\varepsilon_{cpe} & (\varepsilon_{cpemax} \leq \varepsilon_{cpt}) \\ E_{cp0}\varepsilon_{cpe} \left( \frac{\varepsilon_{cpt}}{\varepsilon_{cpemax}} \right)^{\alpha+1} & (\varepsilon_{cpemax} > \varepsilon_{cpt}) \end{cases} \quad (1.20)$$

ここに、 $E_{ag}$ ：骨材の弾性係数 [N/mm<sup>2</sup>]

$\varepsilon_{cpe}$ ：セメントペーストの有効ひずみ

$\varepsilon_{cp}$ ：ひずみ

$\varepsilon_{cpsh}$ ：乾燥収縮ひずみ

$E_{cp0}$ ：セメントペーストの初期弾性係数 [N/mm<sup>2</sup>]

$\varepsilon_{cpt}$ ：弾性限界ひずみ

$\varepsilon_{cpemax}$ ：過去に受けた最大引張有効ひずみ

$\alpha$ ：最大応力に達した以降の応力緩和を表現する材料パラメータ

である。

### 1.2.3 屋外環境下における乾燥収縮ひずみの予測に関する研究

これまで実施されてきた乾燥収縮ひずみの計測実験の多くは、温湿度が一定に保たれた室内での結果であり、それらの成果を基に、後述する乾燥収縮予測式が定式化されている。その一方で、多くのコンクリート構造物は、気温や湿度が常に変動している環境に置かれており、日射や降雨の影響も受けている。これらのさまざまな気象作用が複合的に作用する環境下に置かれたコンクリートがどのような含水状態および収縮挙動を示すのかについても、多くの研究がなされている[1.20][1.21][1.22][1.23][1.24]。角柱試験体を屋外に暴露して検討した事例によると、日射・降雨作用を受けるコンクリートの収縮ひずみは、日射・降雨作用を受けないコンクリートよりも小さくなることが報告されている。しかし、それぞれの作用が収縮に及ぼす影響の定量的な関係については明らかにされていない点が多くあり、さらなる検討が必要であるといえる。

### 1.2.4 有効部材厚[1.25]

有効部材厚とは、断面の寸法や形状の情報を、1次元の長さとして代表化させた値である。乾燥収縮予測においては、寸法の影響を有効部材厚として取り扱うのが一般的であり、部材の体積を大気に接している表面積で除した値である体積表面積比を用いる。棒部材の



図 1.1 矩形断面部材



図 1.2 板部材

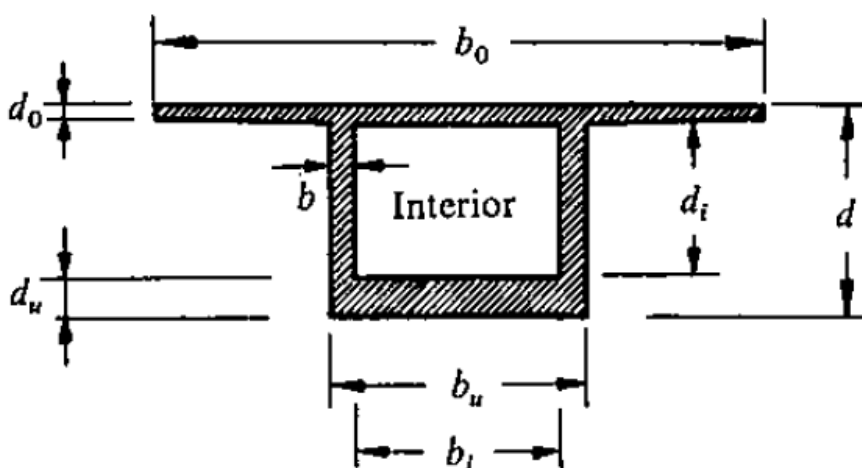


図 1.3 箱型断面部材

場合には、断面積と辺長の比となる。

有効部材厚の計算を示す。断面形状を図 1.1, 図 1.2, 図 1.3 に示す。矩形断面で乾燥面が 4 面である場合には、有効部材厚は式(1.21)で求められる。断面が床部材のような薄い形状の場合には、厚さを無視して計算し、式(1.22)となる。箱型断面のような複雑な形状であっても式(1.23)で求めることができる。有効部材厚によって任意の断面寸法および形状であっても統一的に取り扱うことが可能であるため、収縮予測において寸法や形状の影響を考慮するための指標として便利である。しかし、どのような断面形状であっても有効部材厚が同一であれば同様な収縮挙動を示すのかについては、検討の余地を残している。

$$\frac{2A}{u} = \frac{2bd}{2(b+d)} = \frac{bd}{b+d} \quad (1.21)$$

$$\frac{2A}{u} = \frac{2d\infty}{2\infty} = d \quad (1.22)$$

$$\frac{2A}{u} = \begin{cases} \frac{b_0d_0 + b_u d_u + 2bd_i}{b_0 + d + b_i + d_i} & \text{(中空部分が乾燥条件の場合)} \\ \frac{b_0d_0 + b_u d_u + 2bd_i}{b_0 + d} & \text{(中空部分が非乾燥条件の場合)} \end{cases} \quad (1.23)$$

ここに、 $A$ ：断面積 [ $\text{m}^2$ ]  
 $u$ ：乾燥辺の周長 [ $\text{m}$ ]  
 である。

### 1.2.5 乾燥収縮予測式

2017年制定のコンクリート標準示方書〔設計編〕では、コンクリート部材の収縮ひずみの経時変化を求める方法として、式(1.25)が採用されている[1.26]。この式はこれまでの膨大な室内実験の結果を基に定式化されたものである。

$$\varepsilon'_{ds}(t, t_0) = \frac{\frac{1 - RH/100}{1 - 60/100} \cdot \varepsilon'_{sh,inf} \cdot (t - t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot \beta + (t - t_0)} \quad (1.25)$$

ここに、 $\varepsilon'_{ds}(t, t_0)$ ：部材の乾燥収縮ひずみ  
 $t, t_0$ ：コンクリートの材齢および乾燥開始材齢 [day]  
 RH：構造物の置かれる環境の平均相対湿度 [%]  
 $d$ ：有効部材厚 [mm]  
 $\varepsilon'_{sh,inf}$ ：乾燥収縮ひずみの最終値  
 $\beta$ ：乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数

である。

乾燥収縮予測式では、乾燥収縮の主要な影響因子である使用材料や配合の影響、外部環境条件の影響、寸法や形状の影響を考慮できるように定式化されている。使用材料や配合の影響は、乾燥収縮ひずみの最終値  $\varepsilon'_{sh,inf}$  および乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数  $\beta$  で考慮される。外部環境作用の影響は構造物の置かれる環境の平均相対湿度で考慮することになっている。2017年制定土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕では、日射や降雨の影響を受けた場合と等価な収縮の算定結果をもたらす見かけの相対湿度を用いるのがよいと記載された[1.26]。しかし、見かけの相対湿度の具体的な値の定め方については検討の余地を残している[1.27]。寸法および形状の影響は有効部材厚で考慮する。これまでの寸法および形状に関する検討は小さな試験体の範囲に留まっており、長大寸法の予測精度に関してはさらなる検討が必要である。

### 1.2.6 本研究の方法

本研究の目的は、屋外環境下におけるコンクリートの長期乾燥収縮挙動の予測精度を高めることである。

既往の研究成果により、コンクリート中の水分移動・乾燥収縮モデルが構築され、環境作用についても境界条件において適切に考慮することにより表現できることが確認されている。また、屋外環境下の収縮挙動についても定性的な傾向は明らかになりつつある。しかし、屋外の環境作用がどの程度収縮に影響を及ぼすのかといった定量的な関係についてはまだ明らかとなっていない。このことに起因して、乾燥収縮予測式においても屋外の環境作用を考慮するための見かけの相対湿度をどのように定めるのかも明瞭でない。屋外の環境作用が収縮挙動に及ぼす影響に関する知見を深め、乾燥収縮予測式に反映させることが工学上重要な課題であるといえる。また、実構造物への適用にあたり、実構造物に近い

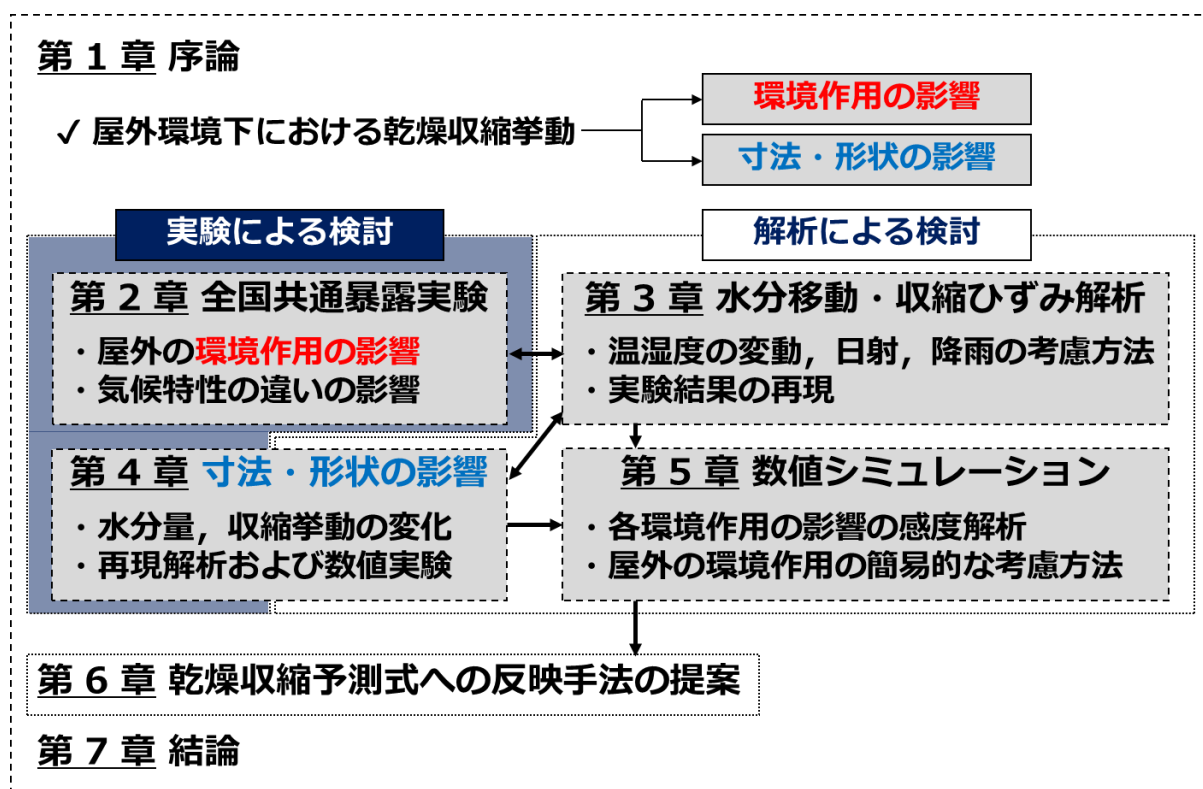


図 1.4 本論文の構成

寸法での検討も必要であり、寸法や形状によって環境作用の影響の程度が異なるかどうかを明らかにすることが重要である。

以上のことから、本研究では、屋外の環境作用がコンクリートの収縮挙動に及ぼす影響を明らかにし、乾燥収縮予測式で考慮するための手法を提案することに主眼を置く。気候特性に起因する環境作用の違いや寸法および形状が収縮挙動に及ぼす影響について、実験と数値解析の双方の観点から検討し、収縮予測において簡便に表現する方法を提案・検証する。

### 1.3 本論文の構成

図 1.4 に本論文の構成を模式的に示す。1章は序論であり、本研究の背景、目的、方法論について述べた。2章では、屋外における環境作用がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響について実験的に検討する。3章では、既往の水分移動・乾燥収縮モデルを用いて2章の実験結果が再現可能かどうか検討する。4章では、寸法や形状がコンクリートの収縮挙動に及ぼす影響について実験と解析の双方から検討する。5章では、2章および4章の実験結果を踏まえて、屋外における各環境作用および部材断面の寸法や形状がコンクリートの乾燥収縮挙動に及ぼす影響について数値実験を行い、予測において考慮が必要な因子を抽出する。6章では、第5章の検討成果を踏まえて、乾燥収縮予測式を用いて屋外環境下のコンクリート部材の乾燥収縮挙動を予測する手法を提案し、その適用性を検証する。7章では、本研究で得られた知見を総括する。

## 第1章の参考文献

- [1.1] 山田宏, 片平博, 渡辺博志: 粗骨材の収縮特性の評価に関する検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 68, No. 1, pp.63-71, 2012
- [1.2] 山田宏, 片平博, 渡辺博志, 下村匠: 骨材の品質の影響に着目したコンクリートの乾燥収縮率の予測に関する検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 76, No. 2, pp.109-118, 2020
- [1.3] 和田宣史, 佐藤良一, 袖山隆行, 雪田憲子: コンクリートのクリープ・収縮の寸法依存性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 21, No. 2, pp.769-774, 1999
- [1.4] 小林仁, 先本勉, 藤井隆史, 綾野克紀, 宮川豊章: 乾燥収縮ひずみに与える部材寸法の影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 4, pp.377-389, 2013
- [1.5] 宮澤伸吾, 黒井登起雄, 松村仁夫: 高強度コンクリートの収縮に及ぼす供試体寸法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 2, pp.613-618, 2000
- [1.6] 宮澤伸吾, 黒井登起雄, 松村仁夫: 高強度コンクリートの収縮ひずみに及ぼす相対湿度および供試体寸法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp.715-720, 2001
- [1.7] 太田光貴, 中山紘紀, 兵頭彦次, 佐藤良一: 高収縮コンクリートの収縮特性と寸法依存性について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp.569-574, 2011
- [1.8] 半坂昌広, 寺西浩司: 部材寸法・形状および相対湿度がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp.481-486, 2005
- [1.9] 綾野克紀, 藤井隆史: コンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値に養生時の温度履歴が与える影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 70, No. 4, pp.428-440, 2014
- [1.10] 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 316, pp.145-152, 1981
- [1.11] 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動, 土木学会論文集, No. 420, pp.61-69, 1990
- [1.12] 石田哲也, Rajesh P.CHAUBE, 岸利治, 前川宏一: 任意の乾湿繰り返しを受けるコンクリートの含水状態予測モデル, 土木学会論文集, No. 564 / V35, pp.199-209, 1997
- [1.13] 柳博文, 福原輝幸, 松岡茂: 不飽和コンクリートの吸水過程に及ぼす水セメント比の影響, 土木学会論文集, No. 683, pp.65-73, 2001
- [1.14] 秋田宏, 藤原忠司, 平井和喜: 毛管作用に基づいたモルタル中の水分移動解析, セメント・コンクリート論文集, No. 51, pp.624-629, 1997
- [1.15] 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, pp.35-45, 1995
- [1.16] 西利明: ひび割れを有するコンクリート中における水分移動現象のモデル化, 長岡技術科学大学修士論文, 1999

- [1.17] Thynn Thynn HTUT, 本馬幸治, 下村匠: 実環境下におけるコンクリート中の水分移動の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp.689-694, 2010
- [1.18] 本馬幸治, Thynn Thynn HTUT, 下村匠: 乾湿を受ける実環境下におけるコンクリート中の水分量に及ぼす表面含浸材の効果とそのモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp.1631-1636, 2011
- [1.19] 小幡浩之, 下村匠: 骨材-ペースト複合モデルによるコンクリート部材の乾燥収縮応力解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp.781-786, 1999
- [1.20] 阿部司, 佐藤良一, 氏家勲, 鳥取誠一: 乾湿繰り返しを受ける RC 部材の長期曲げひび割れについて, コンクリート工学年次論文集, Vol. 17, No. 2, pp.1025-1030, 1995
- [1.21] 大塚歩, 三浦千佳子, 浅本晋吾, 睦好宏史: 屋外暴露されたコンクリートの収縮性状に対する日射および降雨の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp.501-506, 2008
- [1.22] Asamoto, S., Ohtsuka, A., Kuwahara, Y. and Miura, C.: Study on effects of solar radiation and rain on shrinkage, shrinkage cracking and creep of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp.590-601, 2011
- [1.23] 早坂駿太郎, 千々和伸浩, 岩波光保: セメント硬化体の時間依存変形に及ぼす気象作用の影響評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp.436-441, 2014
- [1.24] 大野又稔, 幸良淳志: 降雨含む供用環境下での収縮クリープ予測式に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 2, pp.439-444, 2018
- [1.25] Hubert Rüsçh, Dieter Jungwirh, Hubert K. Hilsdolf: *Creep and Shrinkage Their Effect on the Behavior of Concrete Structure*, Springer-Verlag New York Inc., pp.76-77, 1983
- [1.26] 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, pp.106-110, 2018
- [1.27] 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書改訂資料[設計編・施工編], 土木学会, pp.6-11, 2018



## 第2章 屋外の環境作用がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する全国 共通暴露実験による検討

### 2.1 はじめに

屋外におけるコンクリートの収縮挙動を適切に予測するには、環境作用の影響を適切に考慮することが求められる。一般的な屋外環境下は、気温や湿度が常に変動しており、コンクリート表面では乾燥だけでなく吸湿も生じている。さらに日射による表面および内部温度の上昇に起因する乾燥の促進や、降雨による吸水も起こるため、これらによるコンクリートの含水状態の変化が乾燥収縮に影響する。

また、日本国は南北に長く亜寒帯から亜熱帯まで様々な気候区分に属しており、同緯度であっても日本海側と太平洋側では気候が大きく異なる。そのため、温度および湿度の時間変化量やその平均値、日射、降雨といった環境作用の影響が地域によって異なる。日本国内における気候特性による環境作用の違いがコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響の程度については十分な知見が得られていないが、影響が大きいならば、考慮できるようにすべきである。しかしながら、乾燥収縮の影響因子は暴露環境や使用材料、養生条件など数多く、既往の実測データから環境作用の影響のみを抽出して検討することは困難である。

本研究では、同一の材料、配合、養生方法により作製したコンクリート角柱試験体を用いて気候特性の異なる国内4地点で屋外暴露試験を行い、気候特性に起因する環境作用の違いがコンクリートの乾湿挙動および収縮に及ぼす影響について実験的に検討することとした。

### 2.2 実験の概要

#### 2.2.1 暴露試験実施地点および気象データ

著者らが所属する国内4機関において暴露試験を実施した。暴露地点を図2.1に示す。



図 2.1 暴露試験実施地点

表 2.1 暴露地点の特徴

長岡	新潟県長岡市 長岡技術科学大学構内 海岸から 15 km ほどの内陸部に位置しており、市街地より少し標高が高いため、積雪が多い
横須賀	神奈川県横須賀市 港湾空港技術研究所 暴露試験場が沿岸部に面しており、海との距離は約 30 m 程度
岡山	岡山県岡山市 岡山大学津島キャンパス 海岸から 10 km ほどの内陸平野部に位置しており、沿岸部までの標高差はほぼ無い
沖縄	沖縄県中頭郡西原町 琉球大学千原キャンパス 沿岸部から 2 km ほど離れた台地に位置しており、標高は 125 m 程度

表 2.2 気象データの取得に使用した観測点

暴露地点	取得した気象データとその観測所名		
	気温 降水量 日照時間	相対湿度	全天 日射量
長岡	長岡 観測所	新潟地方気象台	
横須賀	三浦 観測所	横浜地方 気象台	東京管区 気象台
岡山	岡山地方気象台		高松地方 気象台
沖縄	沖縄気象台		

表 2.3 暴露期間中の各地点の気象データ

地点	平均 気温 [°C]	平均 湿度 [%]	年間 日照 時間 [h]	降雨	
				年間 降雨 時間 [h]	年間 降水 量 [mm]
長岡	14.3	75.2	1496	1453	2229
横須賀	16.9	68.9	2200	730	1754
岡山	16.7	71.3	2153	574	1136
沖縄	23.8	77.5	1777	770	2639

これらの4地点の日本国内における気候区分もあわせて示した。屋外暴露実験の測定地点の特徴は表 2.1 に示すとおりである。長岡の暴露地点は、内陸部の長岡技術科学大学構内である。丘陵の近くであるため市街地よりも標高が少し高く、冬期の積雪量が多い地点である。横須賀の暴露地点は港湾空港技術研究所の暴露試験場である。沿岸部に位置し、海までの距離は約 30 m である。岡山の暴露地点である岡山大学津島キャンパスは平野内に位置し、海から 10 km ほど離れている。沿岸部から暴露地点までの標高差はなく、標高は約 4 m である。沖縄の暴露地点である琉球大学千原キャンパスは台地に位置し、沿岸部から約 2 km 程度しか離れていないが、標高は 125 m 程度である。

暴露期間中における各地点の気象データについては、表 2.2 に示す暴露地点近傍の気象庁の観測点（アメダス）および気象台の観測データ[2.1]を使用した。実験期間中の平均的な気象の指標として暴露を開始から2年間のデータをまとめたものを表 2.3 に示す。表中の年間日照時間、年間降雨時間、年間降水量については、2年分のデータを1年分に換算して算出している。また、各月のデータをまとめたものを図 2.2 に示す。期間平均のデータで比較すると、平均湿度に大きな差はなく、70~75%程度の値であった。一方、日照時間や降雨時間には各地で差が見られる。日本海側気候である長岡では、他の地点と比べて日照時間が短く、降雨時間が長くなっている。太平洋側気候の横須賀や瀬戸内式気候の岡山では、日照時間が長く、降雨時間が少ない。このように、気候特性の違いは日射や降雨作用の違いとして現れていることがわかる。また、各季節における降雨頻度や日照時間についても各地で異なっており、長岡は冬期における降雨時間がほかの地点に比べて長いという特徴がある。

第2章 屋外の環境作用がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する  
全国共通暴露実験による検討

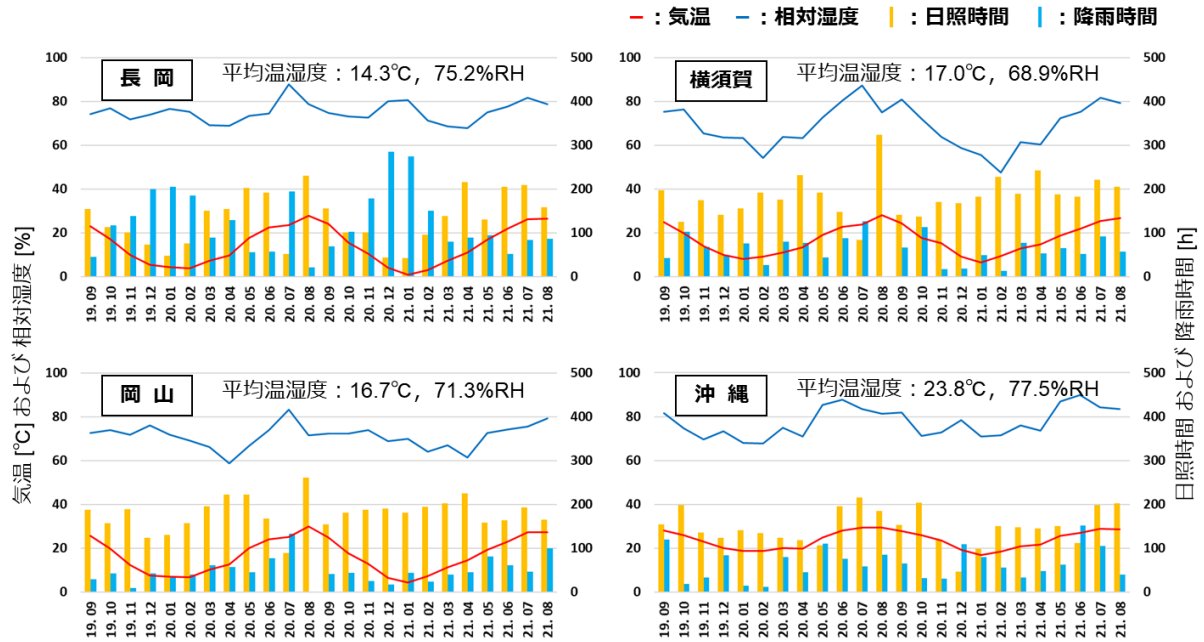


図 2.2 暴露期間の月ごとの気象データ

表 2.4 コンクリートの計画配合

W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
		W	C	S	G	AE 減水剤
50	44	168	336	779	1025	C × 0.8 %

表 2.5 使用材料の物性値

セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	表乾密度 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.94 %
粗骨材	実積率 61.6 %, 表乾密度 2.71 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.33 %, 最大寸法 20 mm
混和剤	標準形 I 種 AE 減水剤
水	上水道水

### 2.2.2 試験体の作製

実験に用いたコンクリートの計画配合を表 2.4 に、使用材料の物性値を表 2.5 にそれぞれ示す。コンクリートの配合は標準的と考えられる配合を設定した。材齢 28 日における圧縮強度の実測値は 40.2 N/mm<sup>2</sup>であった。試験体は乾燥収縮試験の試験体として標準的な形状寸法である 100×100×400 mm の角柱試験体とした。試験体は長岡技術科学大学の実験室ですべて同時に作製した。28 日間 20°C で水中養生を行い、養生終了後、湿布とビニール袋で封緘して各地に送付した。各地に到着後、試験体の 2 側面に長岡・横須賀の試験体は基長 300 mm、岡山・沖縄の試験体は基長 250 mm でコンタクトチップを貼り付け、基長を測定した後、各地点で暴露を開始した。なお、コンタクトチップ貼り付け時から暴露開始まではビニール袋に入れて封緘養生し、暴露開始までできるだけ水分が逸散しないように留意した。



図 2.3 各地点の暴露状況

### 2.2.3 屋外暴露実験方法

屋外暴露実験は2019年9月12日から開始した。暴露開始時のコンクリートの材齢は42日である。各地点に暴露した試験体数は3体である。暴露開始と同時に長岡技術科学大学構内の恒温室(20℃, 50%RH)にも作製した試験体を静置した。本論文では測定開始から2021年8月までのデータを使用している。

試験体の設置状況を図2.3に示す。いずれの地点でも架台等を用いて地表面から200mm以上離れた位置に試験体を静置し、地表面からの日射の照り返しや降雨後の地表面付近の高湿度の影響が出ないようにした。また、長岡の試験体については、降雪があった日は1日2回程度試験体表面に積もった雪を落とし、堆雪による吸水の影響が出ないようにした。測定は1ヶ月に1,2回の頻度で行い、温度ひずみの影響を除去するため、20℃の恒温室に1日程度静置してから質量と長さ変化を測定した。質量は最小目盛が5g以下の電子天秤で測定し、長さ変化はコンタクトゲージ法により0.001mmの精度で測定した。なお、恒温室への移動に関しては、降雨時や降雨直後を避け、移動の際に試験体の表面が濡れていないことを確認して実施した。

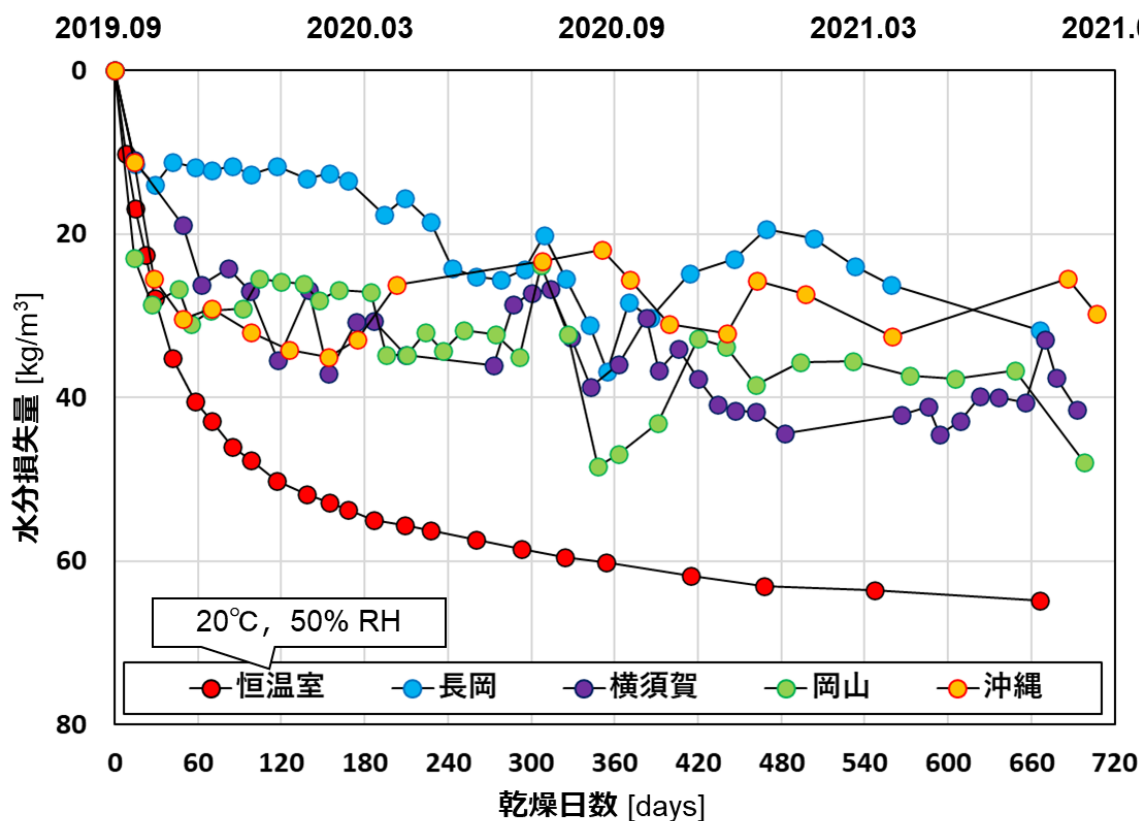


図 2.4 暴露期間中の水分量の変化

## 2.3 実験結果および考察

### 2.3.1 水分量の変化

各暴露地点における暴露試験体の水分量の経時変化を図 2.4 に示す。試験体 3 体の測定値のばらつきは小さかったため、3 体の平均値から水分量の変化を算出した。いずれの地点も恒温室内に静置した試験体よりも水分損失量が少ない。このことから、屋外環境下は恒温室環境下よりも湿潤傾向にあることがわかる。

次に季節ごとの水分量の変化に着目する。12 月から 3 月までの冬期においては、長岡の試験体のみほかの 3 地点よりも水分損失量が少ない。これは冬期に曇りや雨、雪の日が多くなる日本海側の気候特性の影響だと考えられる。ほかの 3 地点では、開始 2 ヶ月程度で進行した乾燥量を維持し、冬期の間については大きな水分量の変化は見られない。長岡では 4 月以降、降雨の頻度が減るにつれて徐々に乾燥量が増加し、夏期にはほかの 3 地点と同程度の乾燥の進行が確認された。

沖縄を除く 3 地点において、7 月頃に一時的に湿潤傾向になり、8 月以降に乾燥量が増加する挙動を示した。図-2 の気象データと照らし合わせると、7 月は降雨が多かった一方で、8 月は年間で降雨が最も少ない月となっている。気象庁によると、7 月は梅雨入りと梅雨明けの間の期間であり [2.2]、降雨が多い期間であった。梅雨明けは長岡・横須賀・岡山の 3 地点で 7 月 30 日 ~ 8 月 2 日頃となっていることから、梅雨の期間のみ一時的に湿潤傾向となり、梅雨明け以降乾燥が著しく進行したと考えられる。沖縄の梅雨の期間は 5 月

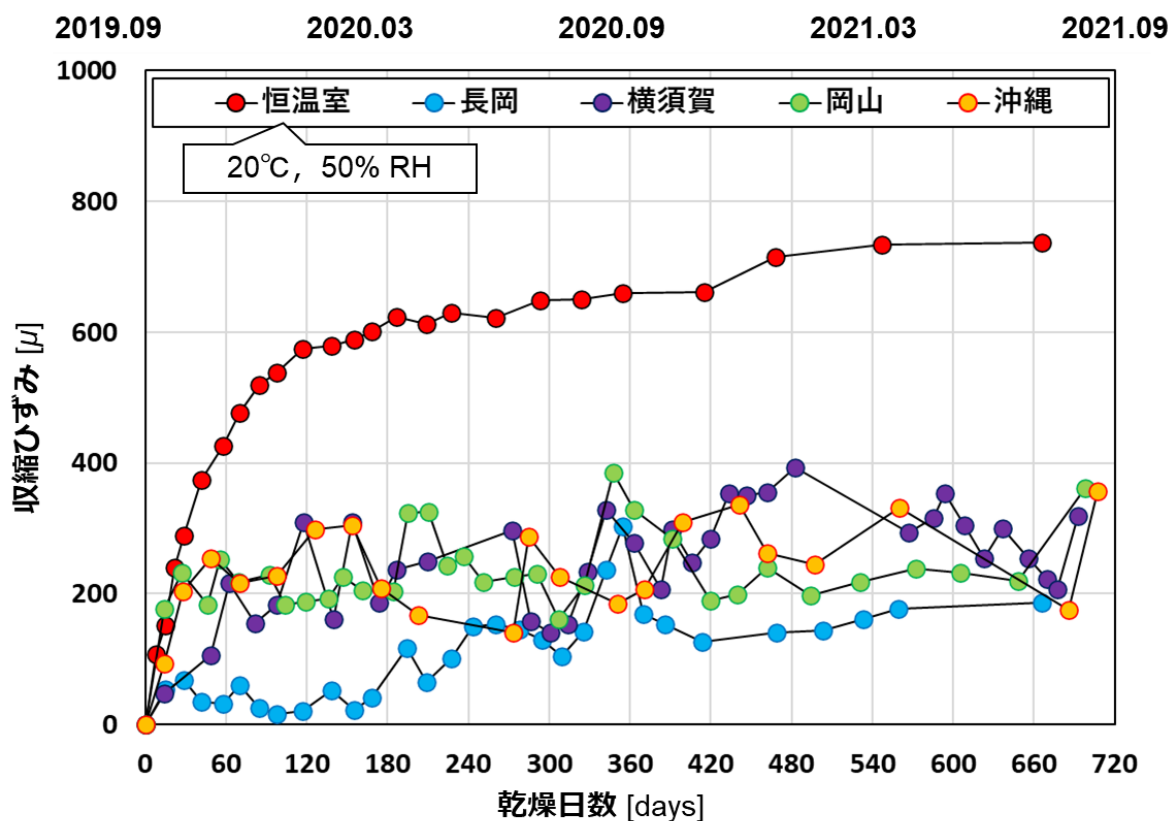


図 2.5 暴露期間中の収縮ひずみの変化

11日～6月12日頃であったが、この期間の実験データが欠測のため、沖縄でも梅雨時期に湿潤傾向を示すかについては確認できなかった。

### 2.3.2 収縮ひずみの変化

暴露試験体の収縮ひずみの経時変化を図 2.5 に示す。試験体 3 体の中での測定値のばらつきは小さかったため、すべての測定値を平均して収縮ひずみを算出した。収縮ひずみは、水分量の変化に追従して変化する挙動を示し、長岡では冬期における収縮ひずみの停滞が確認された。ほかの 3 地点では暴露開始から 2 ヶ月経過した 11 月時点で 200 μ 程度の乾燥収縮の進行が確認されており、7 月まではあまり大きな変化はなく同程度の値を推移した。

長岡・横須賀・岡山の 3 地点については、梅雨の期間である 7 月において、一時的に膨張傾向を示し収縮進行の停滞が確認された。梅雨明け以降は、乾燥が進行するとともに収縮ひずみも増加し、300～400 μ 程度の収縮量となっている。一方、沖縄ではほかの地点と同程度の収縮量ではあるが、冬期における収縮の進行が最も顕著であり、夏期においてはほかの地点よりも降雨が多かったため、収縮の進行は認められなかった。

暴露開始から 1 年が経過した時点では、岡山が最も収縮が進行し、沖縄の収縮量が最も小さい。これは水分損失量においても同じであり、岡山が最も多く、沖縄で最も少ない。しかし、いずれの地点においても期間内での最大収縮量は 400 μ 程度であり、大きな差は見られなかった。一方、収縮が進行する時期は各地で差が見られ、長岡では夏期に収縮が進行したのに対し、沖縄では冬期に最も進行した。横須賀と岡山に関しては、冬期と梅雨

明け以降の夏期の2つの時期に収縮が進行していた。

暴露開始から2年目に入った冬期では、長岡では再び湿潤傾向を示し収縮の進行が見られなくなっている。横須賀や沖縄の試験体では収縮が進行している。2年目の夏期では各地で収縮が進行しており、2年目も1年目と同様の傾向を示していることがわかる。このことから、3年目以降も1,2年目と同様に各季節で収縮の進行および停滞の傾向を示すことが予想される。

以上の実験結果から、屋外環境下のコンクリートは恒温室内に置かれたものよりも収縮量が小さくなること、気候特性の違いによって収縮が進行する時期が各地で異なることが明らかとなった。収縮が進行する時期は降雨が少ない時期であることから、各季節における降雨頻度が収縮挙動に関係していることが示唆された。

## 2.4 第2章のまとめ

屋外環境下のコンクリートの収縮挙動について、気候特性に起因する環境作用の違いが及ぼす影響を、全国4地点で100×100×400 mmのコンクリート角柱試験体を屋外暴露することでその傾向を把握した。第2章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 屋外環境下のコンクリートは、収縮挙動に地域差が生じた。
- (2) 収縮が進行する時期は気候特性の違いが影響し、長岡では夏期に、沖縄では冬期に降雨が少ないため収縮が進行しやすいことを実験によって確認した。横須賀、岡山は降雨の少ない冬期と梅雨明け後の夏期の2つの時期で収縮が進行した。
- (3) 暴露開始2年目においても1年目と同様の挙動が確認され、以降の収縮の進行についても同様の傾向になると推察される。

## 第2章の参考文献

- [2.1] 気象庁：過去の気象データ・ダウンロード，  
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>（最終閲覧日：2021年9月1日）
- [2.2] 気象庁：令和2年の梅雨入りと梅雨明け（速報値），  
[https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/baiu/sokuhou\\_baiu.html](https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/baiu/sokuhou_baiu.html)（最終閲覧日：2021年2月2日）



### 第3章 屋外の環境作用を考慮した水分移動および収縮ひずみ解析による検討

#### 3.1 はじめに

第2章に示した屋外共通暴露実験の結果から、同一のコンクリートであっても環境条件によって収縮挙動が異なることを確認した。また、各地の気象データの比較より、気候特性に起因する環境条件の違いは、温湿度、日射、降雨により表されることを示した。屋外環境下における収縮挙動を精度よく再現するためには、これらの環境作用を考慮できる予測手法が必要である。

本章では、既往の研究で開発されている細孔構造に基づくコンクリート中の水分移動、乾燥収縮モデル[3.1], [3.2]を用いて、全国共通暴露実験の結果の再現を試みる。図3.1に数値解析プログラムによるコンクリートの乾燥収縮挙動を予測するフローの概略を示す。

図3.2に屋外環境下における環境作用を考慮する方法の概要を示す。コンクリート試験体内における水分の移動は、部材軸直交方向の断面内の2次元移動であるとして解析を行った。

降雨が発生していない時間は、コンクリート表面からの水蒸気の出入りを考慮した乾燥・吸湿計算を行う。このとき、気温と日射を考慮した熱伝導解析[3.3]も行い、各表面における日射による乾燥の促進を表現する。降雨が発生している時間帯は、コンクリート表面が液状水に接していると考え、表面における液状水の吸水計算を行う[3.4], [3.5]。

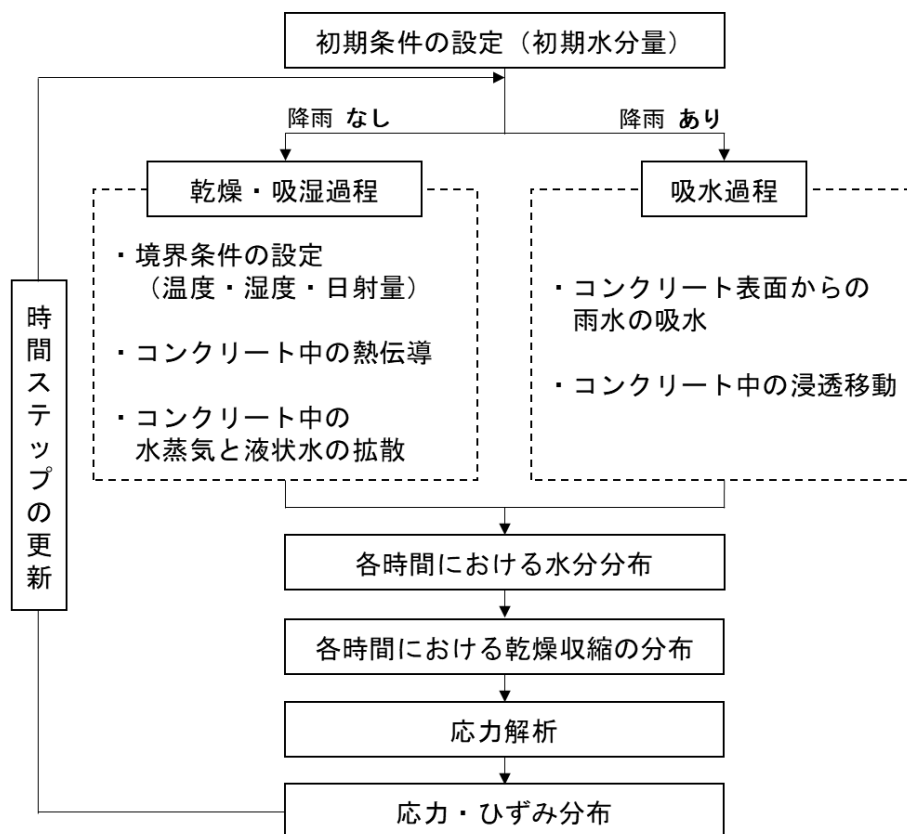


図3.1 数値解析の計算フロー

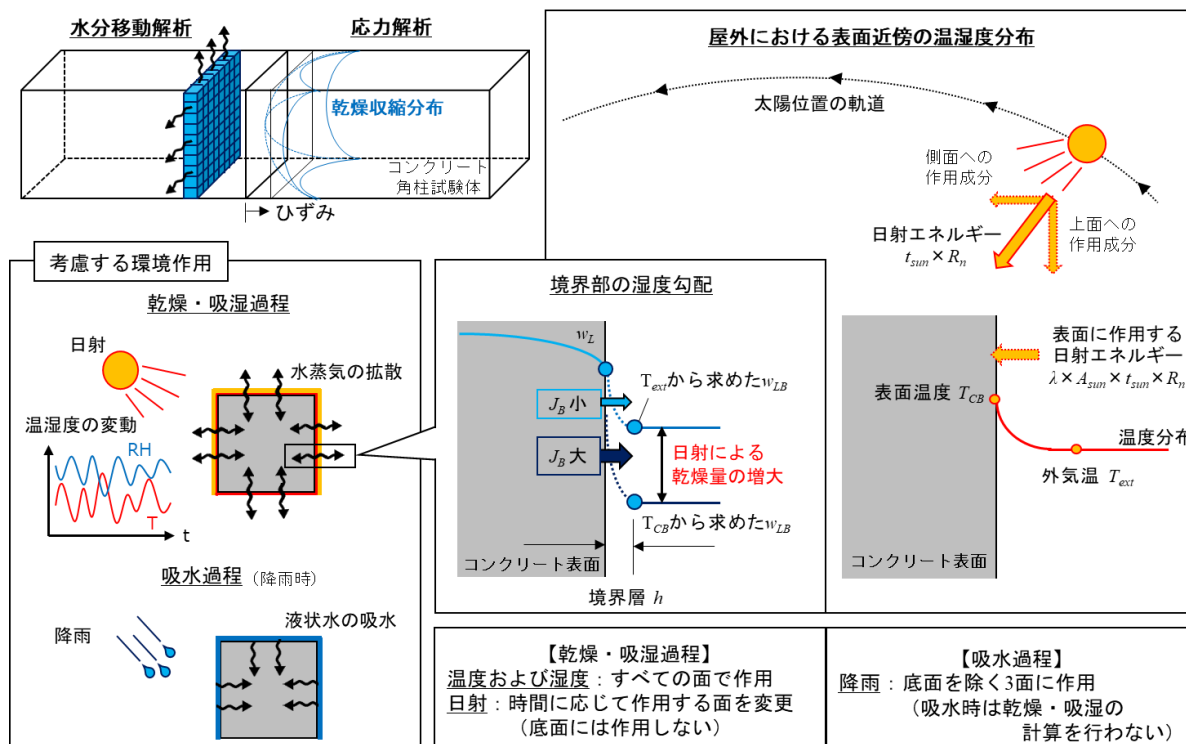


図 3.2 計算方法および各過程における環境作用の考慮方法

### 3.2 水分移動に及ぼす各環境作用の影響の考慮方法

#### 3.2.1 湿度の影響

空気に接したコンクリート表面では、コンクリート内部と外気の湿度差によって水蒸気の流出入が発生する。コンクリート表面における水分移動流束を式(2.1)で表し、乾燥・吸湿を表現した。

$$J_B = D \frac{w_L - w_{LB}}{h} \quad (2.1)$$

ここに、 $J_B$ ：コンクリート表面の水分移動流束 [kg/m<sup>2</sup>/s]

$D$ ：コンクリート中の水分拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]であり、水分量の関数として評価される

$w_L$ ：コンクリート表面の単位体積当たりの水分量 [kg/m<sup>3</sup>]

$w_{LB}$ ：外気の相対湿度に平衡するコンクリート単位体積当たりの水分量 [kg/m<sup>3</sup>]

$h$ ：コンクリート表面に形成される仮想湿度勾配層の厚さ [m]

である。

恒温室のようなコンクリートの表面温度と外気温が常に同じ環境である場合は、外気の相対湿度  $RH_{ext}$  から  $w_{LB}$  を算出する。屋外環境下では、湿度が変化しているため、各時間ステップで使用する相対湿度のデータを与える必要がある。また、コンクリートの温度については、気温の変動や日射の有無により表面温度と外気温が必ずしも一致しない。そのため、3.2.2 項に示す方法で  $w_{LB}$  を算出するための相対湿度を修正した。

### 3.2.2 外気温および日射の影響

屋外環境下は湿度や気温が常に変化している。また、晴天時はコンクリートが日射によって温められ、表面温度が外気温よりも高くなることがある。日射は底面を除く3面に作用するが、作用する面は太陽の位置変化によって異なる。これらの影響を考慮するため、表面における熱流束の境界条件を式(2.2)で表し、各時間ステップでどの面に日射が作用しているかを考慮してコンクリートの温度分布を計算した。

$$q_B = m(T_{ext} - T_{CB}) + \lambda t_{sun} A_{sun} R_n \quad (2.2)$$

ここに、 $q_B$ ：コンクリート表面における熱流束 [W/m<sup>2</sup>]

$m$ ：大気-コンクリート間の熱伝達係数 [W/(m<sup>2</sup> °C)]

$T_{ext}$ ：外気温 [°C]

$T_{CB}$ ：コンクリート表面の温度 [°C]

$\lambda$ ：コンクリートの放射率

$t_{sun}$ ：日照時間の割合

$A_{sun}$ ：太陽との位置関係から作用するエネルギー量を補正する係数

$R_n$ ：全天日射量 [W/m<sup>2</sup>]

である。

太陽との位置関係から作用するエネルギー量を補正する係数  $A_{sun}$  は、太陽の位置軌道を計算するプログラムを作成し、その結果を利用した[3.3]。各地の緯度経度を入力値とすることで方位角と高度の時間変化が出力される。太陽位置の方位角を基に、どの面にどの入射角で日射エネルギーが作用するかを求め、日射による乾燥の促進を表現している。

図 3.2 に示すように、コンクリート表面温度が外気温よりも高くなったとき、コンクリート表面近傍の気温も外気温より高くなる。その結果、表面近傍の相対湿度は外気の相対湿度よりも低くなり、乾燥が促進されると考えられる。この影響について、外気に平衡する水分量を算定する際の外気の相対湿度を修正することで表現した[3.4]。コンクリート表面近傍の相対湿度は、式(2.3)によって求めた。

$$RH_B = RH_{ext} \times \frac{p_{V0}}{p_{V0B}} \quad (2.3)$$

ここに、 $RH_B$ ：コンクリート表面近傍の大気の相対湿度[%]

$RH_{ext}$ ：大気の相対湿度 [%]

$p_{V0}$ ：大気の飽和水蒸気圧 [Pa]

$p_{V0B}$ ：コンクリート表面近傍の大気の飽和水蒸気圧 [Pa]

である。

### 3.2.3 降雨および降雪の影響

降雨時におけるコンクリート表面での液状水の吸水は、既往の研究で提案されている吸水モデル[3.5]、[3.6]を使用し、吸水量を算定した。本検討では、降雨時に底面を除く3面が液状水と接していると仮定して吸水計算を行った。吸水による水分量の変化は、乾燥・吸

湿に比べて短時間に進行し、その変化量も乾燥・吸湿に比べて大きい。そのため、降雨時は、乾燥・吸湿による水分量の変化を無視し、吸水計算のみを行った。また、降雪に関しても降雨と同様に扱うこととした。

### 3.3 収縮ひずみ解析

各位置の水分量の変化に伴う体積変化に起因した試験体の変形・応力解析は、部材軸方向の応力、ひずみ成分のみを考慮し、部材の変形は平面保持に従うとして計算を行った[3.2]。このようにして得られた軸方向の供試体のひずみを本研究では供試体の収縮ひずみとしている。

### 3.4 数値シミュレーションによる実験結果の再現

本数値解析法を用いて、第3章に示した屋外暴露実験結果の再現を行った。水分移動と収縮に関する材料パラメータは、20℃ 50% RHの恒温室内で測定したコンクリート角柱供試体の水分損失量と収縮ひずみの経時変化より同定した。熱伝導に関する材料パラメータは、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に記載されている値[3.7]とし、コンクリートの放射率 $\lambda$ は、解析値が実測した表面温度と一致するよう同定した。なお、本研究では十分に水和が進行したコンクリートを検討の対象としているため、材料特性は材齢によらず終始一定とした。

同定した材料パラメータを表3.1に示す。表中のiniRHは、細孔内の初期相対湿度を表

表 3.1 同定した材料パラメータ

iniRH	$V_0$	$B$	$C$	$K_V$	$K_L$	$K_{LP}$
96.5 %	0.155	21500	0.5	0.075	0.0015	0.045

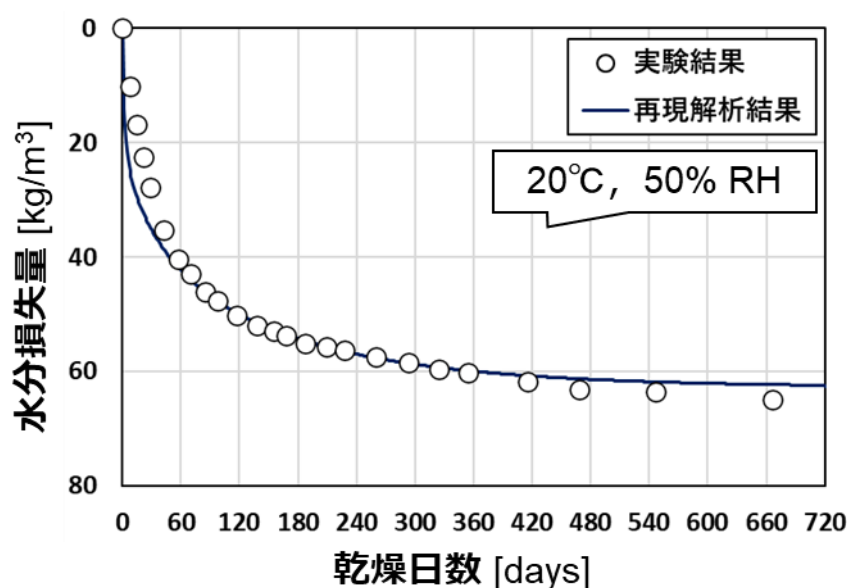


図 3.3 恒温室内における水分量の変化に関する再現解析

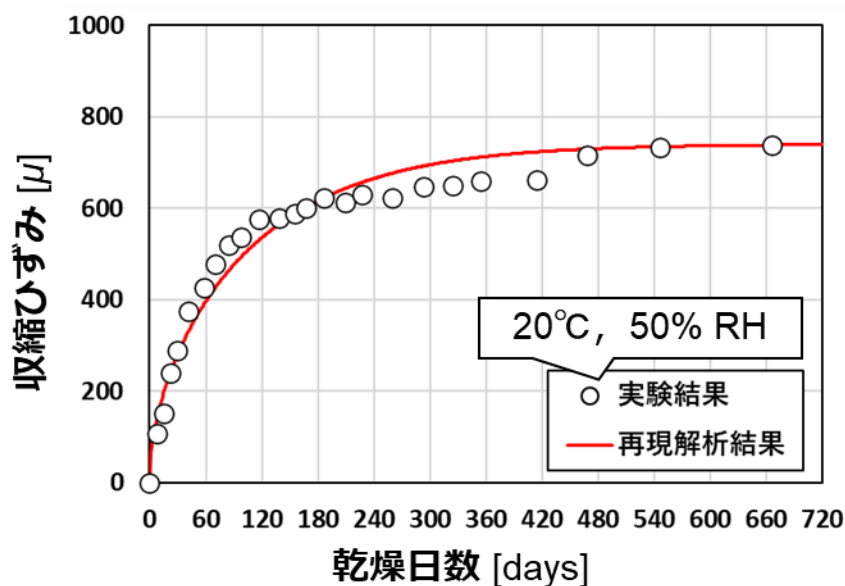


図 3.4 恒温室における収縮ひずみの変化に関する再現解析

す。また、恒温室内の水分量および収縮ひずみの時間変化の再現解析の結果を図 3.3 および図 3.4 に示す。この実験結果に合うように、材料パラメータを同定したので良好に再現できている。同じ材料パラメータを、屋外に暴露した試験体の再現解析においても適用する。

各屋外暴露地点の水分量の経時変化に関する再現解析を図 3.5、収縮ひずみの経時変化に関する再現解析を図 3.6 にそれぞれ実験結果とともに示す。今回の計算では時間ステップを 1 時間とし、気温、相対湿度、日照時間、全天日射量、降水量の 1 時間ごとの値を表 2.2 に示した気象観測点の観測記録から取得し、各時間ステップで気象データを更新することで各地の環境作用を表現した。降雨の判定は、降雨が記録される最小量である 0.5 mm でコンクリート表面が濡れると仮定し、降雨が観測された時間帯ではコンクリートの表面で雨水の吸水が生じるとして吸水計算を行った。

いずれの暴露地点の結果においても、乾湿挙動および収縮ひずみの変化について解析値と実験値が一致していることがわかる。このことから、本研究で用いた水分移動解析および応力解析法は、温度、湿度、日射、降雨の影響を考慮しつつ、屋外におけるコンクリートの乾湿および収縮挙動を再現できる精度を有することが確認された。

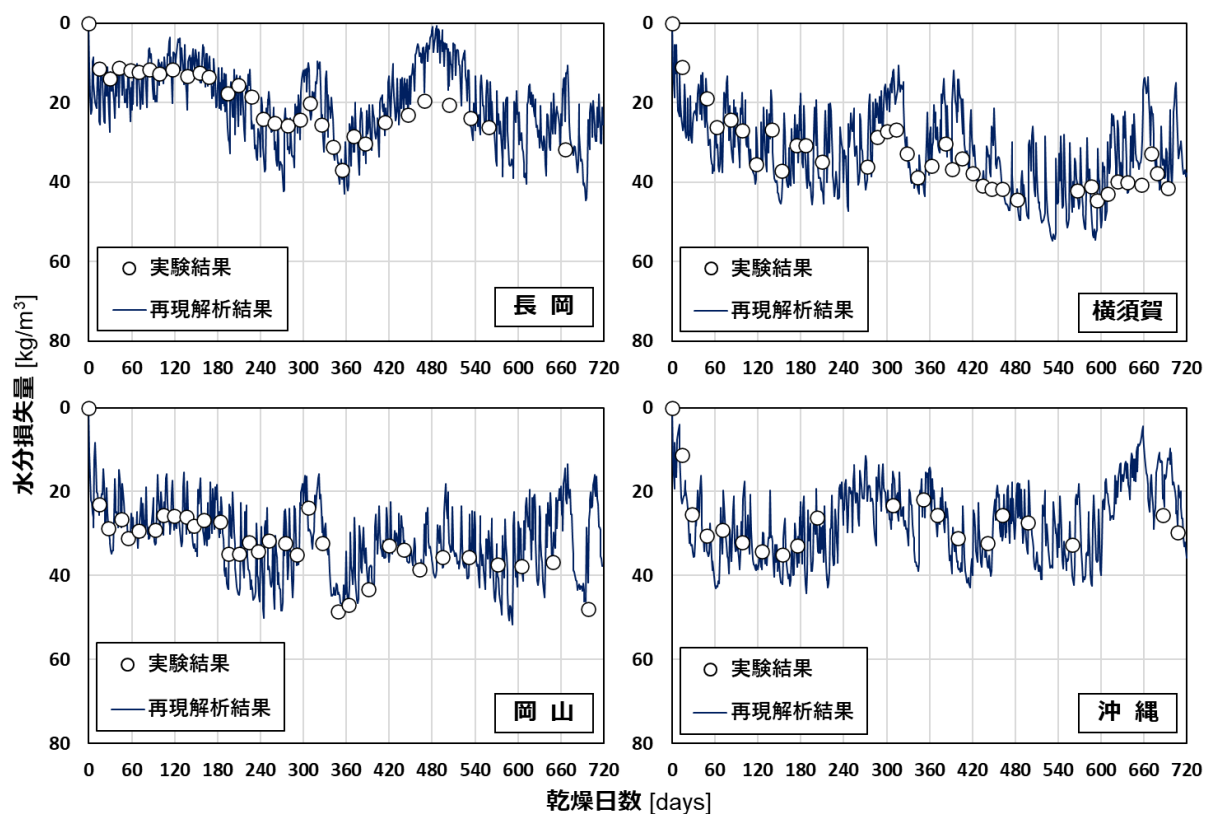


図 3.5 各暴露地点の水分量の変化に関する再現解析

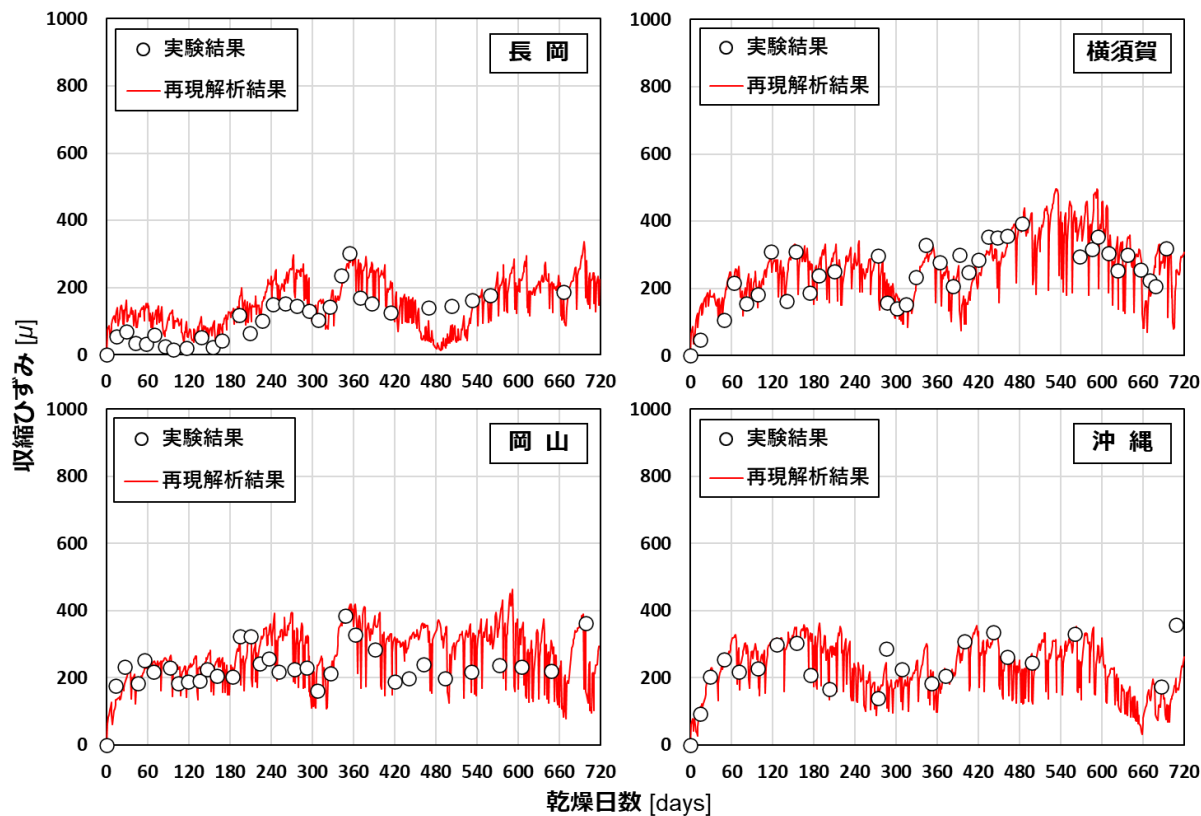


図 3.6 各暴露地点の収縮ひずみの変化に関する再現解析

### 3.5 第3章のまとめ

第2章に示した実験結果から、同じコンクリートであっても環境条件によって収縮挙動が異なることを確認した。各地の気候特性は温湿度、日射、降雨により表されるので、屋外での収縮を精度よく再現するには、これらの作用を考慮できる予測手法が必要である。そこで、細孔構造に基づくコンクリート中の水分移動、乾燥収縮モデルを用いて実験結果の再現を試みた。第3章で得られた知見を以下に示す。

- (1) いずれの暴露地点の結果においても、乾湿挙動および収縮ひずみの変化について解析値と実験値が一致した。
- (2) 本研究で用いている水分移動解析および応力解析法は、温度、湿度、日射、降雨の影響を考慮しつつ、屋外におけるコンクリートの乾湿および収縮挙動を再現できる精度を有していることが確認された。

### 第3章の参考文献

- [3.1] 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, pp.35-45, 1995
- [3.2] 小幡浩之, 下村匠: 骨材-ペースト複合モデルによるコンクリート部材の乾燥収縮応力解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp.781-786, 1999
- [3.3] 長沢工: 日の出・日の入りの計算 天体の出没時刻の求め方, 地人書館, 1999
- [3.4] 女屋賢人, 下村匠, Thynn Thynn HTUT: 屋外一般環境下におけるコンクリート構造物中の含水状態の長期変動解析法の高精度化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No.1, pp.760-765, 2014
- [3.5] Thynn Thynn HTUT, 本馬幸治, 下村匠: 実環境下におけるコンクリート中の水分移動の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No.1, pp.689-694, 2010
- [3.6] 本馬幸治, Thynn Thynn HTUT, 下村匠: 乾湿を受ける実環境下におけるコンクリート中の水分量に及ぼす表面含浸材の効果とそのモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No.1, pp.1631-1636, 2011
- [3.7] 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, pp.325-336, 2018



## 第4章 部材断面の寸法および形状がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する検討

### 4.1 はじめに

第2章での実験により、屋外環境下における環境作用が収縮挙動に及ぼす影響について把握した。また、第3章での数値解析を用いた検討により、温度湿度の時間変動、日射、降雨を考慮することで、屋外環境下に置かれたコンクリートの水分量の変化および収縮ひずみの変化を気候特性が異なる場合であっても数値解析で再現できることを示した。

第2章での実験は100×100×400 mmの角柱試験体を用いた検討に留まっており、寸法が大きくなった場合でも同様の挙動を示すのかについては、さらなる実験によって把握する必要がある。また、実際の構造物中のコンクリート部材は寸法が大きいばかりでなく、箱型断面などのように形状が複雑であるものも少なくない。

本章では、300×300×1800 mmの無筋コンクリート角柱試験体を作製して第2章にて示した内容と同様の暴露実験を実施し、寸法の違いが収縮挙動に及ぼす影響について実験的に検討した。また、第3章に示した数値解析手法を用いて、寸法や形状が乾燥収縮挙動に与える影響に関する数値実験を行い、実験において未検討の範囲について解析的に検討した。

### 4.2 部材寸法が水分移動に及ぼす影響に関する実験

#### 4.2.1 実験の概要

既往の研究において、寸法によって収縮ひずみの最終値や経時変化が異なることは多数報告されている[4.1][4.2][4.3][4.4][4.5][4.6][4.7]。寸法によって内的拘束の程度が異なり、変形量の差として観測されているのか、水和反応熱による温度履歴の違いなどの要因でコンクリート自体の細孔構造が寸法によって異なるために収縮量に差が生じるのか、既往の研究成果から断定することは困難である。

長大寸法である実構造物では、局所的な水分量を測定することは可能であるが、構造物の総水分量の経時変化を測定することは不可能である。設計においては断面の平均収縮ひずみを用いるのが一般的であり、構造物中の部材の総水分量の変化に着目して検討できるのが望ましい。また、既往の数値解析モデルについても、寸法が異なる場合において妥当な結果が得られるのかについては検証する必要があるといえる。

本実験では、本研究で用いる数値解析手法が寸法の異なる場合においても適用可能であるかどうかを確認することを目的とし、実験結果と数値解析結果の再現を試みた数値解析結果を比較することで検討する。

実験に用いたコンクリートの配合を表4.1、使用材料の物性値を表4.2に示す。試験体の寸法は表4.3に示す3水準とし、厚さが100 mmで断面寸法のみが異なる試験体を作製した。作製した試験体は28日間水中養生を行ったのち、水分の移動が断面内の2次元移動になるようにエポキシ樹脂を用いてシールした。その後、気温20℃、相対湿度50%の恒

表 4.1 コンクリートの計画配合

W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
		W	C	S	G	AE 減水剤
53	44	165	311	791	1029	C × 0.8 %

表 4.2 使用材料の物性値

セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	表乾密度 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.98 %
粗骨材	実積率 61.3 %, 表乾密度 2.68 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.64 %, 最大寸法 20 mm
混和剤	標準形 I 種 AE 減水剤
水	上水道水

表 4.3 試験体水準

試験体	試験体の寸法
No.1	100×100×100 mm
No.2	200×200×100 mm
No.3	300×300×100 mm

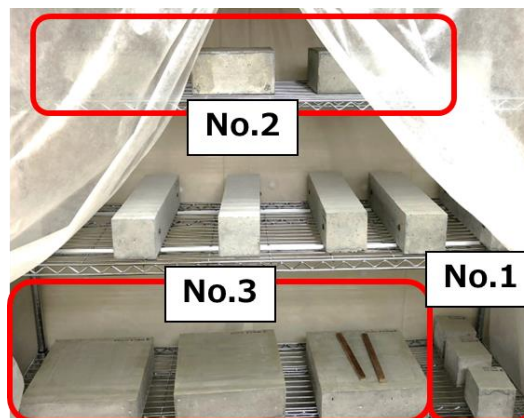


図 4.1 恒温室内に静置した試験体

恒温室内に静置し，水分量の変化を質量変化の測定によって把握した．実験の様子を図 4.1 に示す．

#### 4.2.2 実験結果と数値解析の比較による考察

配合および養生条件が同一で，寸法のみが異なる試験体の恒温室内における水分量の変化に関する実験結果および再現解析結果を図 4.2 に示す．寸法の違いによって水分量の経時変化が異なり，寸法が大きい試験体ほど乾燥速度が遅いことがわかる．これは既往の研究で示されている，寸法が大きいほど乾燥収縮の進行が遅いという傾向と一致する．

再現解析結果に着目すると，各寸法の実験結果の傾向を良好に再現できていることがわかる．材料パラメータは表 4.4 に示すとおりであり，寸法によらず同一の値を使用してい

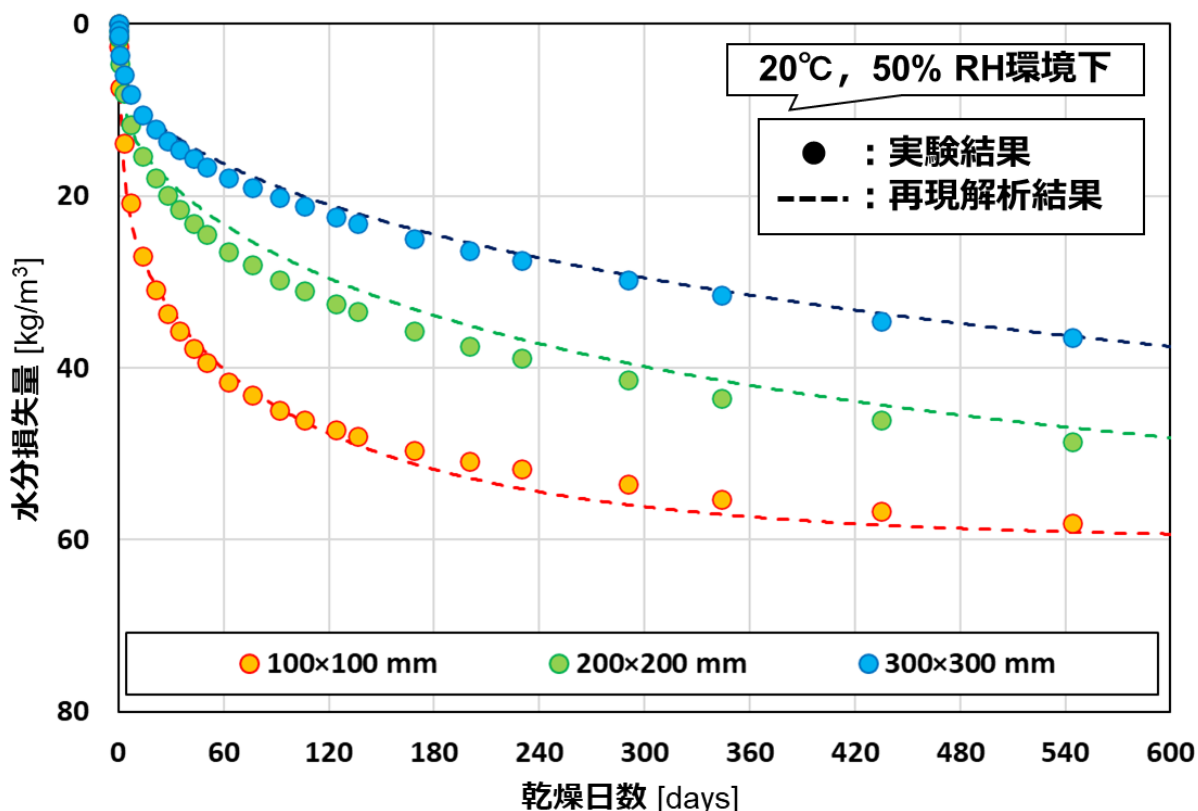


図 4.1 恒温室内に静置した試験体

表 4.4 同定した材料パラメータ

iniRH	$V_0$	$B$	$C$	$K_V$	$K_L$	$K_{LP}$
96.0 %	0.150	20000	0.5	0.05	0.001	—

る．このことから，今回の実験の寸法の範囲においては，数値解析モデルが寸法に依存しておらず適用可能であること，また実際のコンクリートの細孔構造にも寸法による違いが見られないことが明らかとなった．

### 4.3 部材寸法が乾燥収縮挙動に及ぼす影響の検討

#### 4.3.1 実験の概要

第3章において，環境作用の影響を考慮できるコンクリートの水分移動・乾燥収縮モデルを用いて，実測データに基づいて屋外での環境作用を考慮することで屋外暴露されたコンクリート供試体の水分量や収縮ひずみの経時変化を再現できることを示した．しかしながら，断面寸法が小さな試験体での検討に留まっており，長大寸法における収縮挙動を再現できるかどうかを実測データとの比較によって検証する必要がある．

そこで，本実験では，断面寸法が異なる場合における屋外環境下の自由収縮ひずみの経時変化を実験で確認するとともに，寸法が異なる場合においても第3章で用いた数値解析によって再現可能であるか検討する．

実験に用いたコンクリートの計画配合および使用材料の物性値は表 4.1 および表 4.2 に



(1) 長岡に暴露した試験体

(2) 横須賀に暴露した試験体

図 4.3 暴露した試験体の様子

示したものと同一である。材齢 28 日における圧縮強度の実測値は  $35.8 \text{ N/mm}^2$  であった。試験体の寸法は  $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$  および  $300 \times 300 \times 1800 \text{ mm}$  の無筋コンクリートとし、長岡技術科学大学の実験室で同時に作製した。いずれの寸法の試験体も 28 日間封緘養生を行い、養生終了後、基長 300 mm で側面にコンタクトチップを貼り付け、基長を測定した後、大学構内および港湾空港技術研究所の 2 ヶ所にて屋外暴露を開始した。

屋外暴露実験は、長岡では 2019 年 11 月 20 日から、横須賀では 2019 年 12 月 4 日から開始した。暴露開始時のコンクリートの材齢は 28 日および 42 日である。暴露した試験体数は、2 地点でそれぞれ  $100 \times 100 \text{ mm}$  断面の試験体が 3 体、 $300 \times 300 \text{ mm}$  断面の試験体が 1 体である。暴露開始と同時に室温  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 50 % の恒温恒湿環境下にも  $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$  試験体を静置した。屋外暴露の試験体の設置状況は図 4.3 に示すとおりであり、架台を用いて地表面から 200 mm 以上離れた位置に試験体を静置し、地表面からの日射の照り返しや降雨後の地表面付近の高湿度の影響が出ないように留意した。また、降雪があった日は 1 日 2 回程度試験体表面に積もった雪を落とした。測定は 1 ヶ月に 1, 2 回の頻度で行い、 $100 \times 100 \text{ mm}$  断面の試験体については質量と長さ変化を、 $300 \times 300 \text{ mm}$  断面の試験体については長さ変化のみを測定した。質量は最小目盛が 1 g の電子天秤で測定し、長さ変化はコンタクトゲージ法により  $0.001 \text{ mm}$  の精度で測定した。また、 $300 \times 300 \text{ mm}$  断面の試験体については断面中央部に埋め込み型ひずみ計を埋設し、データロガーによる計測もあわせて行った。

#### 4.3.2 実験結果と数値解析の比較による考察

$100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$  の試験体および  $300 \times 300 \times 1800 \text{ mm}$  の試験体の収縮ひずみの経時変化に関する実験結果を図 4.4 および図 4.5 に示す。恒温室に置かれた試験体が最も収縮が進行していることがわかる。恒温室に静置した試験体の収縮は 1 年が経過して以降ほとんど進行せず、約  $700 \mu$  に収束した。屋外に暴露した試験体については、 $100 \times 100 \text{ mm}$  断面の試験体では収縮の時間変動幅が大きく、外部環境作用の影響を強く受けていることがわかる。 $300 \times 300 \text{ mm}$  断面の試験体の収縮の時間変動は、 $100 \times 100 \text{ mm}$  断面に比べて小さくなっている。このことから、寸法が大きくなるほど、外部環境作用の影響による収縮の変動幅は小さくなると思われる。暴露開始から約 2 年が経過した時点での収縮ひずみは、

長岡で  $150\ \mu$  程度，横須賀で  $200\ \mu$  程度であった。

$300\times 300\ \text{mm}$  断面については，コンタクトチップによる測定と埋め込み型ひずみ計による測定を実施した．両者の測定結果を比較したものを図 4.6 に示す．測定方法の違いによる差は見られなかったことから，表面と中心部でのひずみ差は小さく，どちらの測定方法でも断面の平均収縮ひずみを計測できていると考えられる．

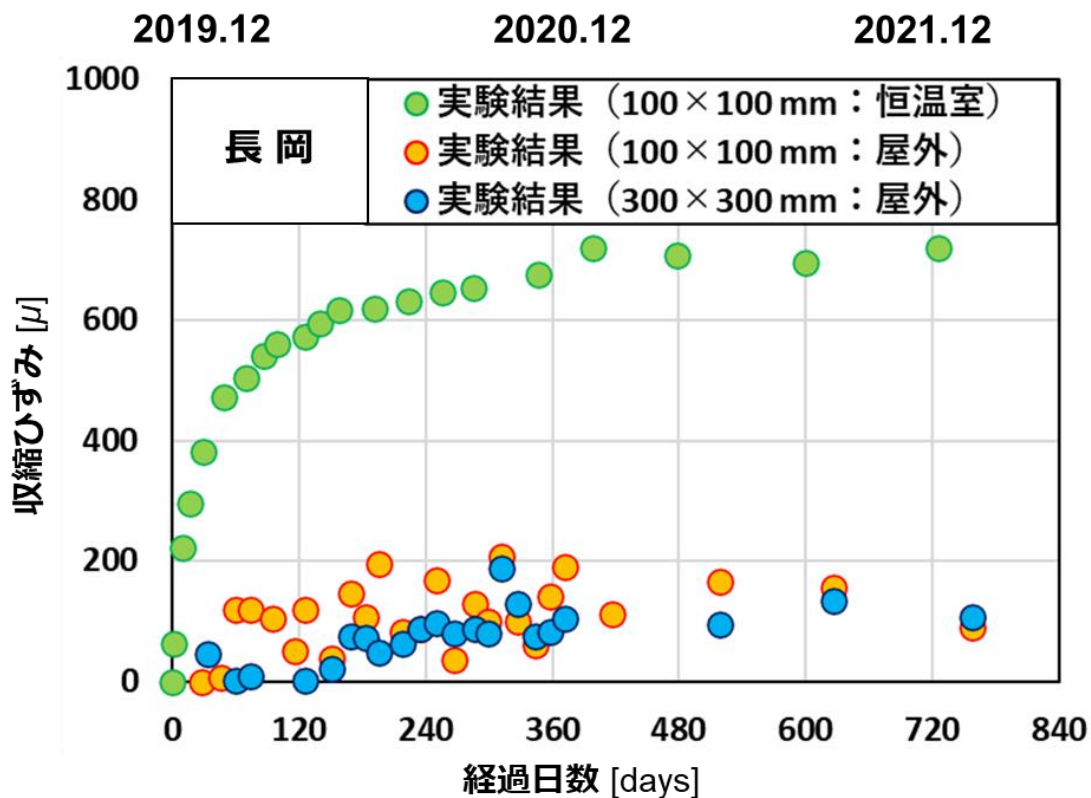


図 4.4 長岡に暴露した各試験体の収縮ひずみの経時変化

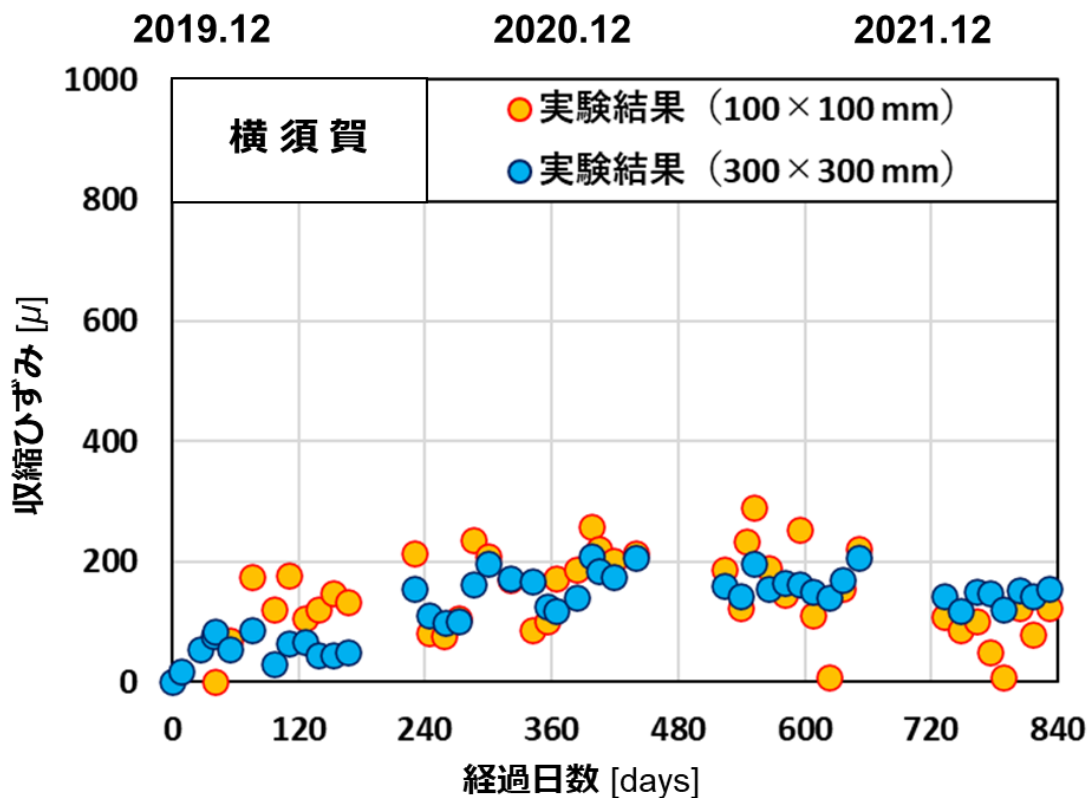


図 4.5 横須賀に暴露した各試験体の収縮ひずみの経時変化

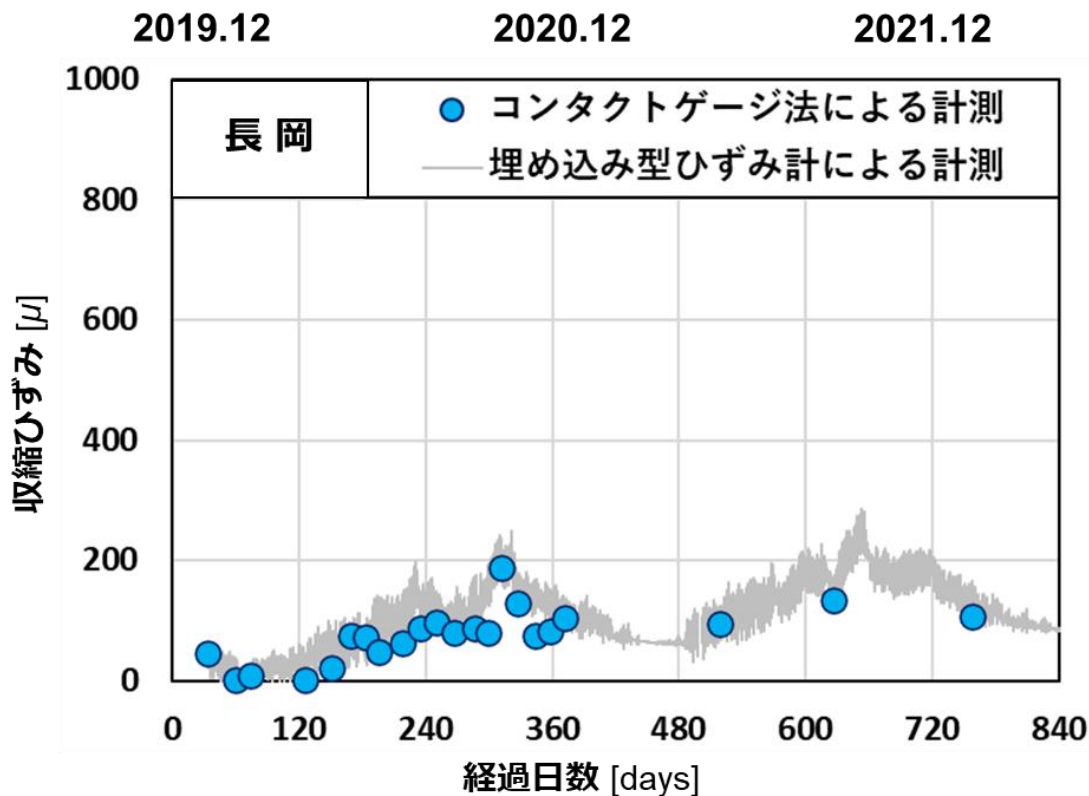


図 4.6 長岡に暴露した試験体における各測定による収縮ひずみの経時変化

表 4.5 同定した材料パラメータ

iniRH	$V_0$	$B$	$C$	$K_V$	$K_L$	$K_{LP}$
96.0 %	0.150	20000	0.5	0.1	0.002	0.06

寸法が異なる場合においても屋外環境下における収縮挙動を良好に再現できるか検証する必要がある。数値シミュレーションによる実験結果の再現解析結果を図 4.7 および図 4.8 に示す。

材料パラメータの値は、恒温室内に静置した試験体の水分量および収縮ひずみの経時変化が実験値と一致するように決定した。同定したパラメータを表 4.5 に示す。配合が同一であるにもかかわらず、表 4.4 に示した材料パラメータと一部異なる値となっているのは、養生条件の違いに起因するものと考えられる。一般に、水中養生を行った試験体は常に外部から水分が供給され水和反応が促進されるため、封緘養生したものよりも細孔構造が緻密になる。

再現解析の結果は、屋外に暴露した試験体の実験結果について、双方の断面における収縮挙動を良好に再現できていることがわかる。このことから、今回用いた数値解析手法は、寸法が異なる場合においても適用でき、収縮ひずみの経時変化を精度良く予測可能であることが確認された。数値解析結果においても、寸法によって収縮の時間変動量が異なる結果となっており、実験結果で見られた傾向とよく一致している。

今回の実験の範囲では断面寸法による違いは見られず、各地の気候特性によって収縮量が異なる結果となっているように見受けられる。しかし、実験期間中において乾燥収縮がまだ進行中であった場合においては、時間が十分に経過し、収縮の進行が収束した時点の収縮ひずみに寸法による違いがみられる可能性はある。今回の実験期間および測定結果からは収縮の進行が収束しているかどうかは断定することができず、数値解析結果からも言及することはできなかった。そのため、次項で述べる数値実験によって検証を行うこととする。

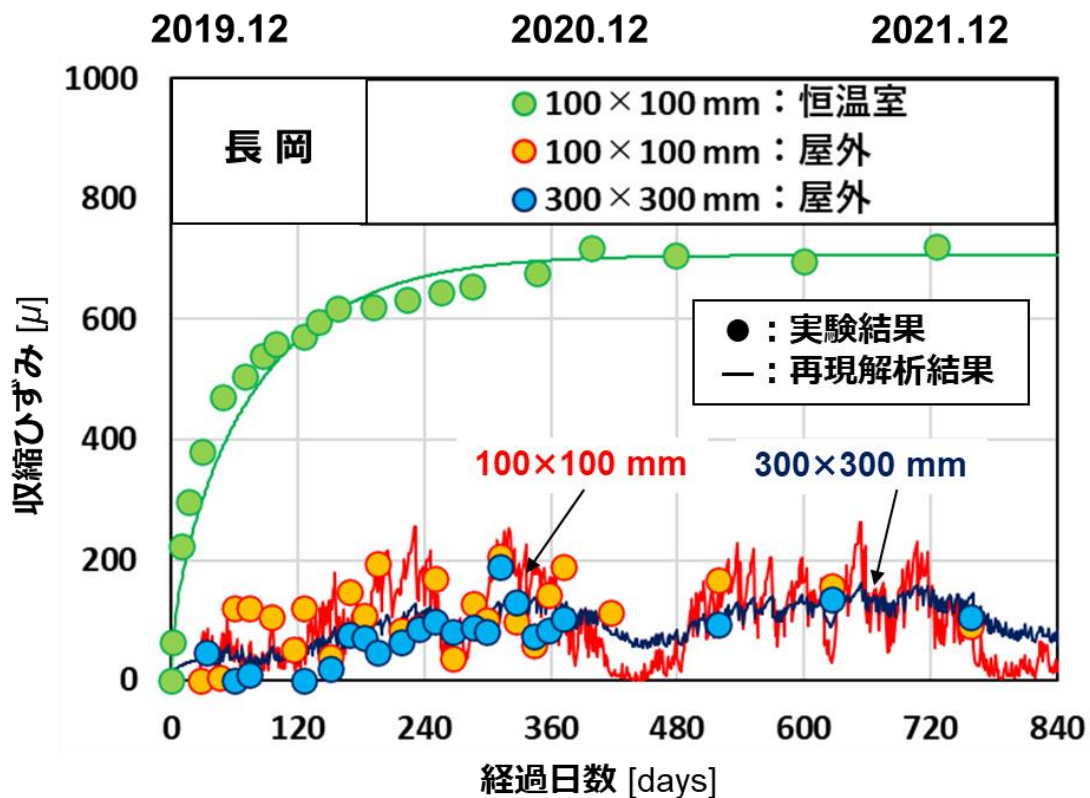


図 4.7 長岡での屋外暴露実験の数値解析による再現

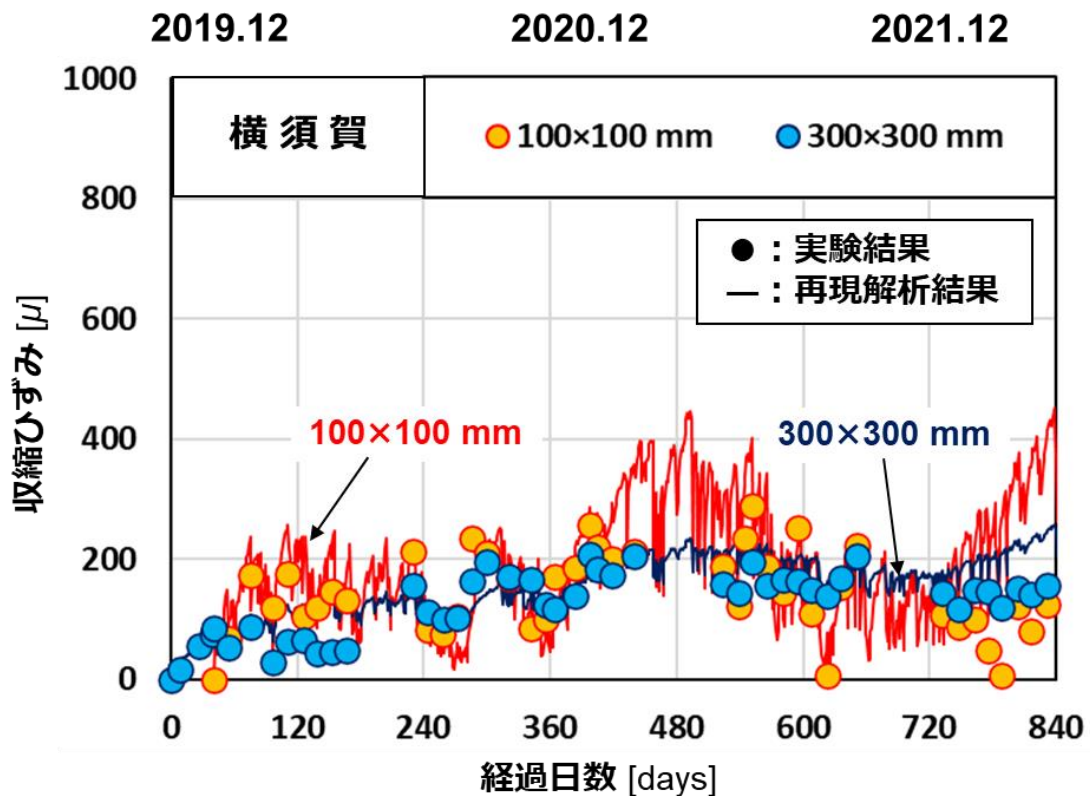


図 4.8 横須賀での屋外暴露実験の数値解析による再現



### 4.3.3 寸法が乾燥収縮挙動に与える影響に関する数値実験

前項に示した実験および数値解析の検討結果から、寸法によって収縮の時間変動量が異なり、寸法が大きいほど変動量が小さくなることが明らかとなった。また、その傾向を数値解析においても確認することができた。一方、2年間の屋外暴露の結果からは寸法によって収縮の進行が収束した時点における収縮量が異なるかについては確認することができなかった。

本検討では、実験結果の再現によって精度が保証された数値解析手法を用いて、長期間の収縮ひずみの経時変化を計算し、一定の値への収束に至るまで解析を実行する。各寸法において収束した時点での収縮量を比較し、寸法が収縮ひずみの最終値に与える影響について検討することとした。

解析ケースを表4.6に示す。寸法については、一般的な角柱試験体である100×100 mm断面から、実構造物レベルの大きさである1000×1000 mm断面までを検討の範囲とした。環境条件としては室内実験を想定した気温20℃、相対湿度50%環境下と屋外の2水準とした。なお、気象データについては、2章で示した暴露実験の実施期間である2019年9月から2021年8月までの2年間の横須賀のデータを利用した。2年間で1サイクルとし、以降同様の気象データを繰り返し用いている。

表 4.6 解析ケース

断面寸法 [mm]	暴露環境条件
100×100	温湿度一定の環境下 (20℃, 50%RH)
200×200	
300×300	
400×400	
600×600	
100×100	屋外環境下 (横須賀の気象データ) 2019.09 ~ 2021.08
300×300	
600×600	
1000×1000	

解析結果を図4.9および図4.10に示す。温湿度が一定の環境下である場合の結果について、断面寸法が大きなものほど収縮の進行が遅く、収縮ひずみが一定値に収束するまでの時間が長くなっていることがわかる。しかし、数値解析の結果においては収縮ひずみの最終値は寸法によらず一定となっている。これは与えている材料パラメータが同一であるためである。実際の構造物は、寸法によって温度履歴が異なることに加えて、時空間的に材料特性が変化すると考えられるため、寸法による違いがみられる可能性は十分にある。

屋外環境下の場合については、寸法によって収縮の時間変動量が異なり、寸法が大きいほど変動量が小さくなることが改めて示された。収縮の変動幅が異なる要因は、断面積と外部環境に接している周長の比率にあると推察される。寸法が小さい場合は、面積周長比

#### 第4章 部材断面の寸法および形状がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する検討

が小さいため、外部環境の影響を強く受けることになる。寸法が大きくなるほど、面積周長比が大きくなるため、外部環境の影響に対する感度も小さくなると考えられる。収縮の進行が収束した段階における平均収縮ひずみについては、屋外環境下の場合でも寸法によらず同一であった。数値解析においては、外部環境作用の影響を境界条件で考慮している。境界条件が同一であるため、収縮量には差が生じなかったと考えられる。

また、同一の断面寸法で暴露環境条件の違いに着目したとき、屋外環境下は恒温室内に比べて収縮の進行の収束が早くなっている。600×600 mm 断面において、恒温室内環境下では収束に50年程度要するのに対し、屋外環境下では10年程度で収束しており、その差は著しい。これは屋外環境下では環境作用の影響により水分損失量が小さくなるため、収縮のポテンシャルが恒温室内環境下よりも小さいからだと考えられる。

以上のことから、寸法が収縮挙動に与える影響は時間変動量のみであり、収縮量は寸法によらず同一であること、屋外環境下では乾燥収縮の収束に要する時間が恒温室内環境下よりも短くなることが明らかとなった。

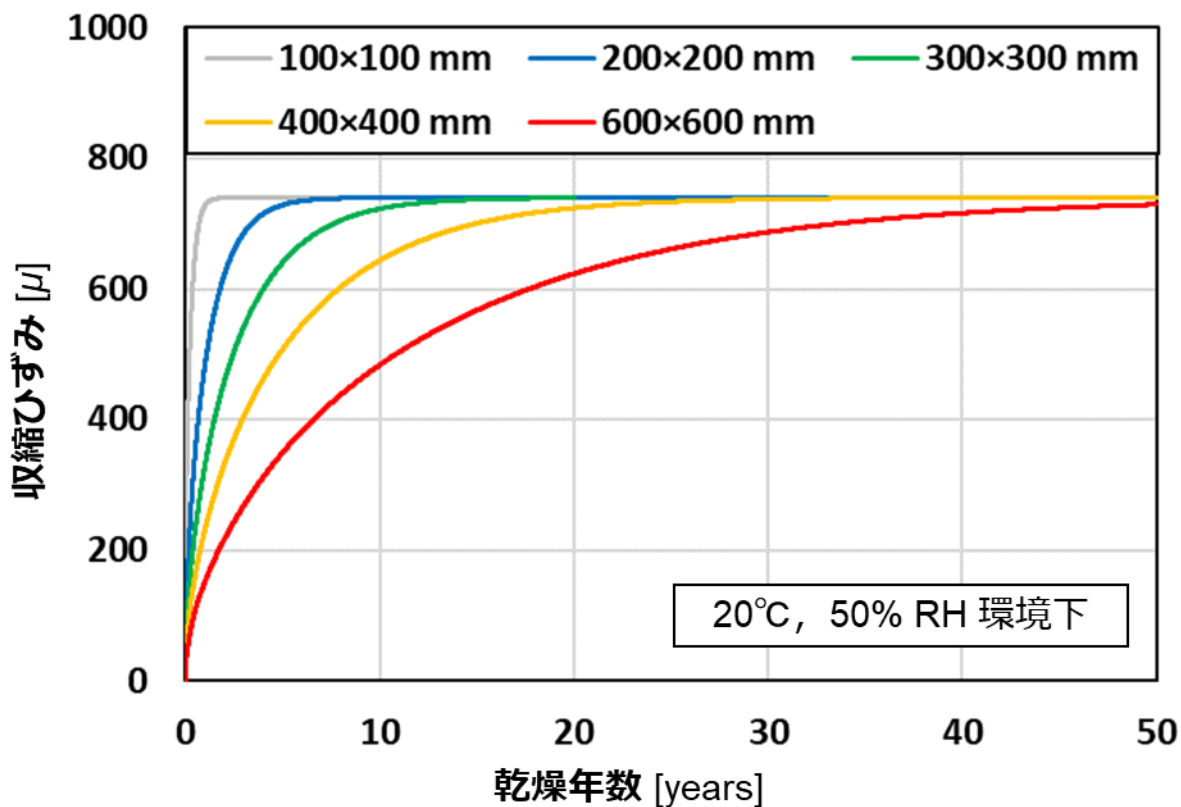


図 4.9 温湿度が一定の環境下における長期収縮解析結果

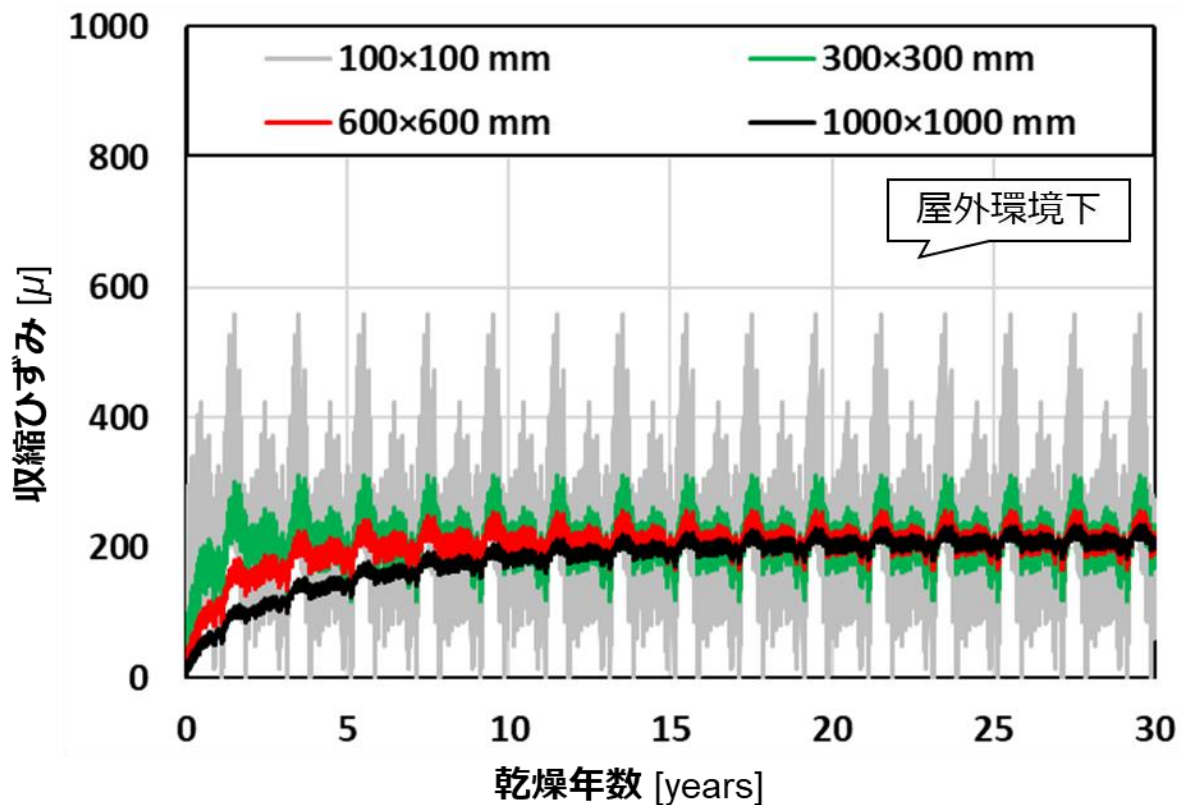


図 4.10 屋外環境下における長期収縮解析結果

#### 4.4 部材の形状が乾燥収縮挙動に及ぼす影響の検討

##### 4.4.1 数値実験の概要

これまでの実験や数値解析による検討は、すべて矩形断面での検討となっている。しかし、実際の構造物中の部材は形状が単純なものばかりではなく、その形状によって受ける環境作用の影響が各面によって異なる場合も考えられる。コンクリート構造物の収縮予測の高精度化において、寸法の影響だけでなく、形状の影響も検討すべきである。

本検討では、矩形断面のみ計算可能であった既存の数値解析プログラムを中空断面も計算できるように改良し、中空断面における収縮挙動の数値シミュレーションを実施した。変更後の数値解析のプログラムのリストについては、付録 A に収録している。

解析ケースを表 4.7 および表 4.8 に示す。中空断面の場合、内部の面に作用する環境作用の影響をどのように考慮するかが重要であると考えられる。今回の検討では、内部の面が乾燥する場合と非乾燥の場合を想定した。内部が非乾燥である場合は水分の移動がないため、境界部における水分流束が 0 であるとした。内部の面が乾燥面である場合には、これまでの検討と同様に、外気温、相対湿度を境界条件として設定する。しかし、内部の面には日射や降雨は作用しないため、晴天時や降雨時において外部の面で日射や降雨を考慮している場合であっても、内部の面には作用しないとして境界条件を設定した。なお、気象データについては、2019 年 9 月から 2021 年 8 月までの 2 年間のデータを 1 サイクルとし、収縮の進行が収束に至るまで繰り返し使用した。

以上の仮定のもとで、温湿度が一定の環境下と屋外環境下の 2 つの暴露環境条件について長期収縮解析を実行した。

表 4.7 中空断面での解析ケース A (内部乾燥)

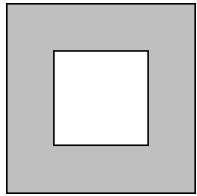

断面寸法 [mm]	形状および乾燥条件	暴露環境条件
400×400 (中空部：200×200)		温湿度一定の環境下 (20°C, 50 %RH)
		屋外環境下 (横須賀の気象データ) 2019.09 ~ 2021.08

表 4.8 中空断面での解析ケース B (内部非乾燥)

断面寸法 [mm]	形状および乾燥条件	暴露環境条件
400×400 (中空部：200×200)		温湿度一定の環境下 (20°C, 50 %RH)
		屋外環境下 (長岡の気象データ) 2019.09 ~ 2021.08

#### 4.4.2 数値解析結果および考察

解析結果を図 4.11 および図 4.12 に示す。温湿度が一定の環境下である場合の結果について、内部を非乾燥条件としたものは、内部が乾燥条件であるものよりも収縮の進行が遅く、収束に要する時間が長くなっている。収束に至るまでの時間は内部の乾燥条件によって差が生じるものの、最終収縮ひずみについては差が見られない。これは暴露環境条件が同一であるためである。

屋外環境下の場合の結果については、暴露環境条件が同一であっても内部の乾燥条件によって収縮量に若干の差が生じており、内部を乾燥条件とした解析結果は平均収縮量が大きくなっている。この差が生じた要因は、外部の面と内部の面とで作用する環境作用が異なるためであると考えられる。外部の面では気温、湿度、日射、降雨が作用するが、内部の面では気温と湿度のみが作用し、日射、降雨は作用しない。屋外環境下の収縮量が小さくなるのは降雨の影響を受けているためであり、降雨の影響を受けない内部の面では収縮が進行し、その結果収縮量が大きく算定されたものと考えられる。

以上の結果から、中空断面における収縮挙動は、すべての乾燥面で作用する環境作用が同一である場合には、最終収縮ひずみは内部の乾燥条件によらないことが明らかとなった。中空内部の面が乾燥条件であり、外部の面に日射や降雨が作用する場合には、収縮ひずみが大きくなる傾向があることを示した。

今回の検討においては、内部の気温および湿度は外部と同一であると仮定して解析を実行したが、実際には外部と内部で温湿度が異なる場合も想定される。実構造物中の空間的な温湿度環境の違いを把握し、実際に構造物が受けている条件下で再度検討を行う必要があると考えられる。

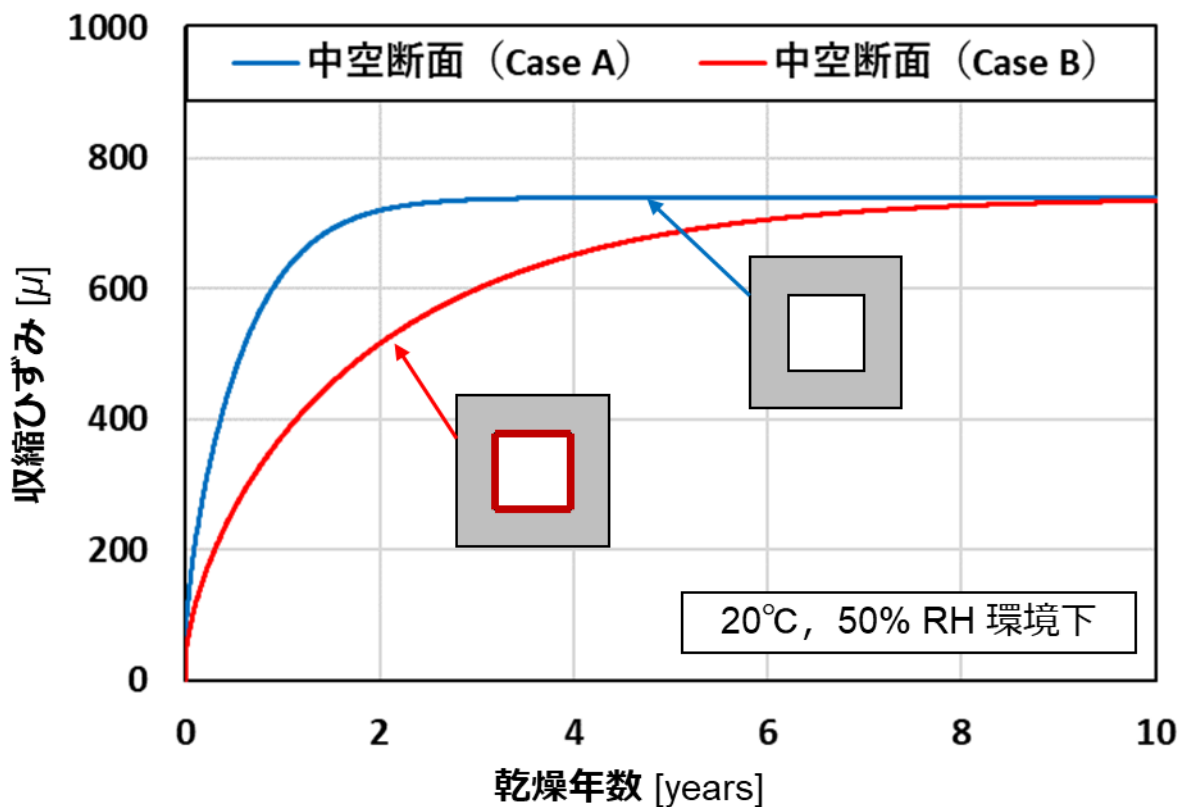


図 4.11 温湿度が一定の環境下に置かれた中空断面部材の長期収縮解析結果

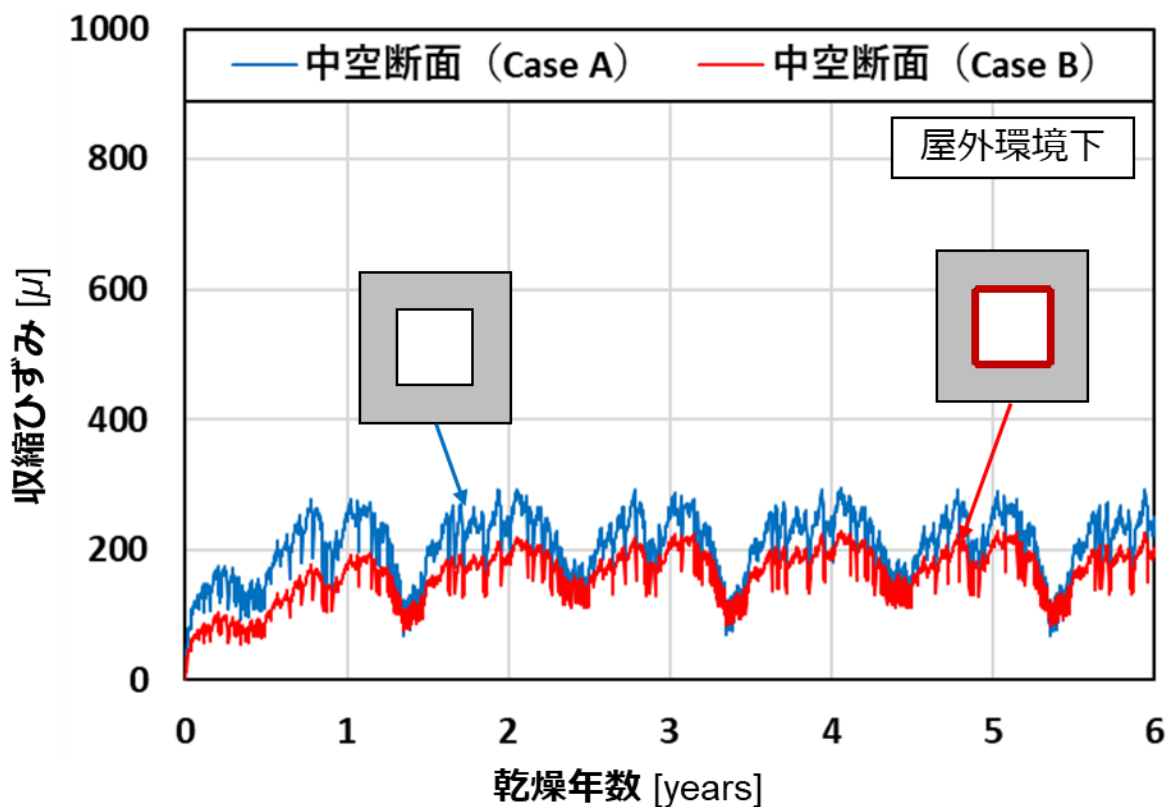


図 4.12 屋外環境下に置かれた中空断面部材の長期収縮解析結果

## 4.5 乾燥収縮予測における有効部材厚の適用性に関する解析的検討

### 4.5.1 検討内容の概要

有効部材厚は、部材断面の寸法や形状の情報を簡易的に表す指標として用いられる。算出方法も容易であるため、土木学会のコンクリート標準示方書〔設計編〕に記載されている乾燥収縮予測式においても導入されており、式(4.1)を用いて算出される。乾燥収縮予測式では、断面の寸法や形状は異なるが有効部材厚が同一である場合には、算出される収縮ひずみの経時変化は同一となる。

$$d = 4V/S \quad (4.1)$$

ここに、 $d$ ：有効部材厚 [mm]。全面が乾燥の棒部材の場合、一辺の長さとしてよい。

$V/S$ ：体積表面積比 [mm]。表面積には外気に接する部分の表面積を用いる。  
である。

本検討では、有効部材厚が同一の値になるように複数の寸法・形状の断面を設定し、収縮ひずみの経時変化を数値解析によって求めた。解析結果を比較することで、有効部材厚が同一であれば収縮ひずみの経時変化も同様であるのか、違いがある場合には、その差はどの程度であるのかについて解析的に検討する。

解析ケースを表 4.9 に示す。断面形状は矩形断面と中空断面の 2 種類とし、寸法および乾燥面の数で有効部材厚が同一となるように設定した。なお、有効部材厚は式(4.1)から算出した値である。暴露環境条件については、収縮の経時変化の比較が最も容易となる、温

表 4.9 有効部材厚に関する検討の解析ケース A

断面形状	寸法 [mm]	乾燥条件	有効部材厚	環境条件
矩形断面	100×100	2面乾燥	200 mm	温湿度一定の環境下 (20℃, 50%RH)
	200×200	4面乾燥	200 mm	
	300×300		300 mm	
	200×600		300 mm	
中空断面	400×400 (中空部：200×200)	内部乾燥	200 mm	
		内部非乾燥	300 mm	

湿度が一定の環境下とした。

### 4.5.2 数値解析結果および考察

表 4.9 に示した解析ケースにおいて、有効部材厚が 300 mm の結果を図 4.13 に、有効部材厚が 200 mm の結果を図 4.14 に示す。有効部材厚が 300 mm の結果については、正方形断面、長方形断面、内部が非乾燥条件である中空断面のいずれの結果も、収縮ひずみの経時変化は同様の挙動であることがわかる。この結果から、有効部材厚が同一であれば、正方形断面と長方形断面の差は小さく、中空断面についてもその形状の影響を有効部材厚によって考慮できていることが示された。

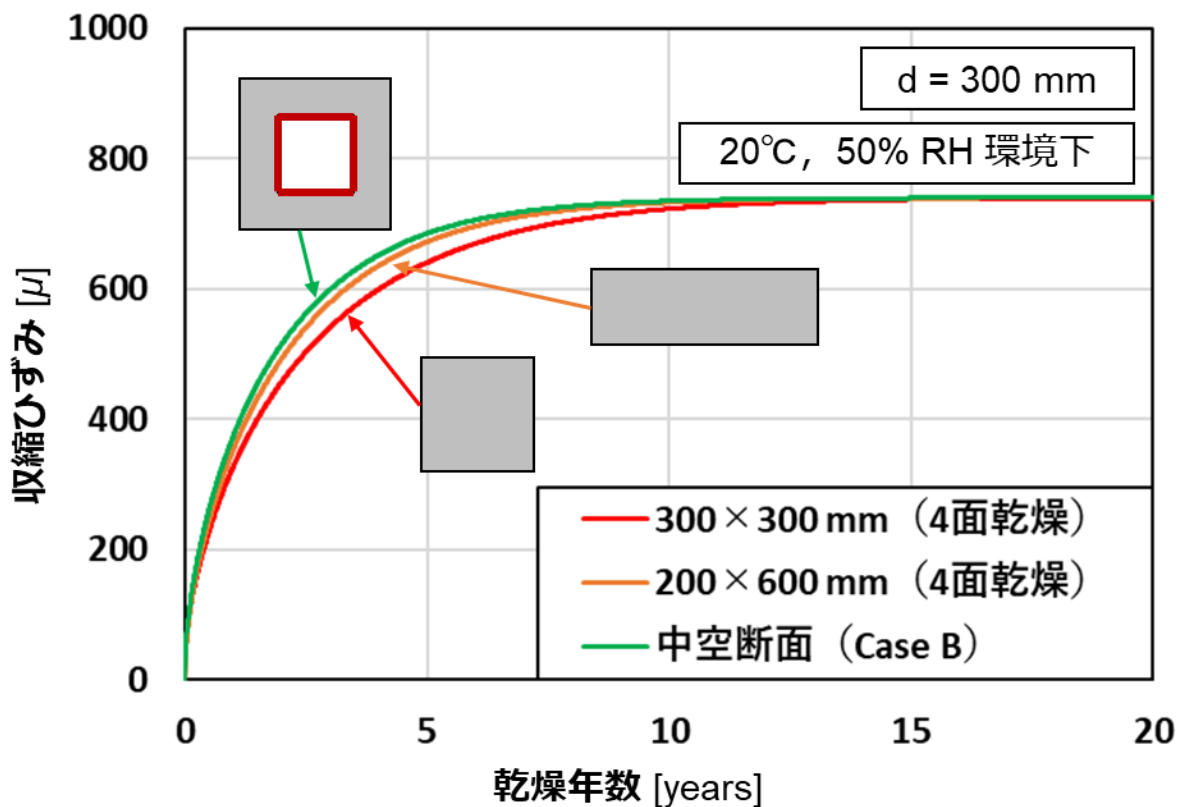


図 4.13 有効部材厚が 300 mm である断面に関する長期収縮解析結果

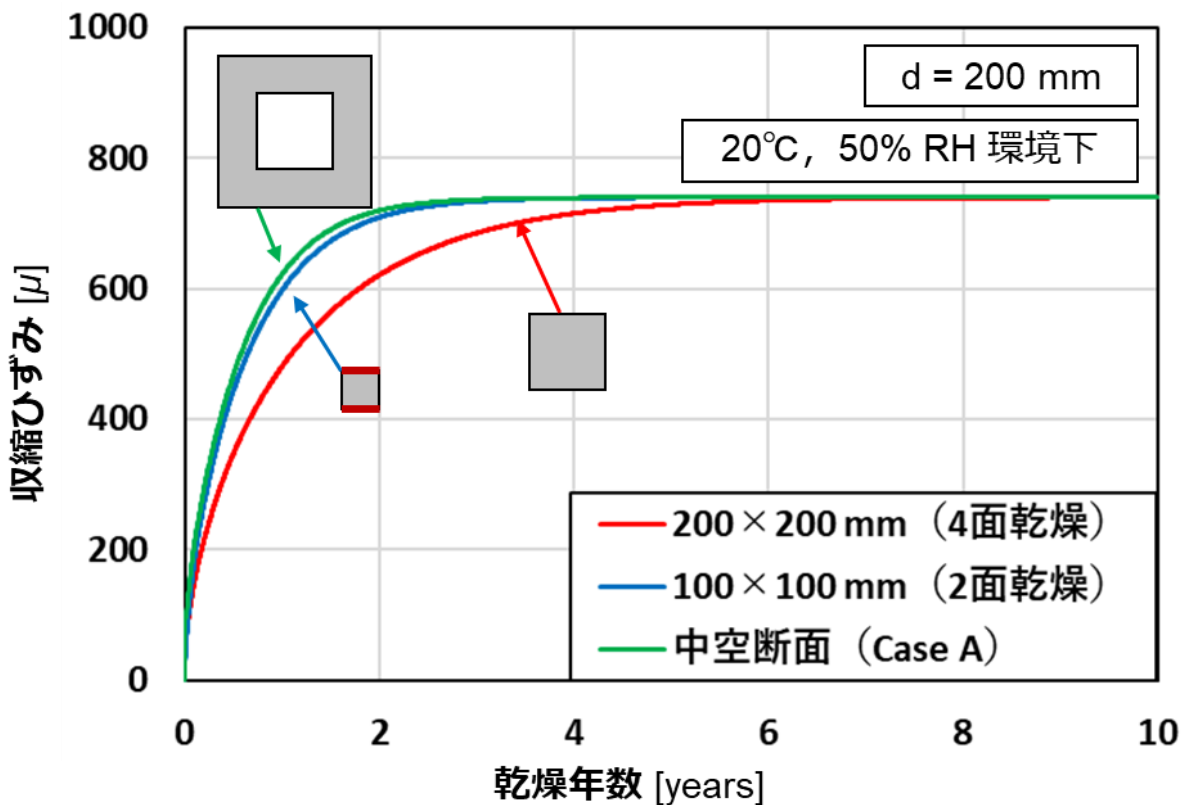


図 4.14 有効部材厚が 200 mm である断面に関する長期収縮解析結果



#### 第4章 部材断面の寸法および形状がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する検討

一方、有効部材厚が 200 mm となるように設定した断面については、100×100 mm 断面の 2 面乾燥や内部が乾燥条件である中空断面において、同一の有効部材厚である 200×200 mm 断面の 4 面乾燥に比べて収縮の進行が早い傾向を示した。この結果からは、有効部材厚が同一であっても、乾燥収縮の経時変化に差が生じる可能性があることを示しており、先ほどの結果とは相反するものとなっている。

ここで、収縮の進行が早い傾向を示した原因について考察する。収縮の進行が早い傾向を示した結果の断面形状および乾燥条件は、矩形断面では 2 面乾燥、中空断面では内部を乾燥条件としたものであり、乾燥面は 8 面である。図 4.13 に示した結果は、断面の寸法や形状は異なるものの、いずれも乾燥面は 4 面である。乾燥面の数の違いによる乾燥の違いとして、隅角部の影響が考えられる。向かい合う面が非乾燥条件とした 2 面乾燥では、断面内の水分の移動が 1 次元になるため、隅角部が発生しない。4 面乾燥、8 面乾燥では断面内の水分移動は 2 次元であるため隅角部が発生し、4 面乾燥では 4 箇所、内部が乾燥条件の中空断面（8 面乾燥）では 8 箇所生じる。この隅角部の有無やその量が進行の速度に影響していると考えた。

上記の仮説を検証するため、追加の解析を実施した。2 面乾燥は、ある厚さを有する長さが無限大の部材と考えることができる。そこで、300×300 mm 断面の形状を徐々に扁平にし、厚さ 150 mm で長さが無限大の断面形状へと変形させた場合に、収縮の進行がどのように変化するかを確認した。解析ケースは表 4.10 に示すとおりであり、どの断面形状においても有効部材厚は 300 mm となるように設定した。結果を図 4.15 に示す。有効部材厚が同一であっても、断面形状が扁平になるほど収縮の進行が早くなっていることがわかる。

以上の検討結果から、有効部材厚は部材断面の寸法や形状の影響を表す指標としてある程度の適用性を有すること、有効部材厚が同一であっても薄い部材や乾燥面が多い部材では収縮の進行が早い傾向にあることが示された。

表 4.10 有効部材厚に関する検討の解析ケース B

断面形状	寸法 [mm]	乾燥条件	有効部材厚	環境条件
矩形断面	300×300	4 面乾燥	300 mm	温湿度一定の環境下 (20℃, 50 %RH)
	200×600			
	180×900			
	160×2400			
	150×∞ (150 mm の 2 面乾燥)	2 面乾燥		

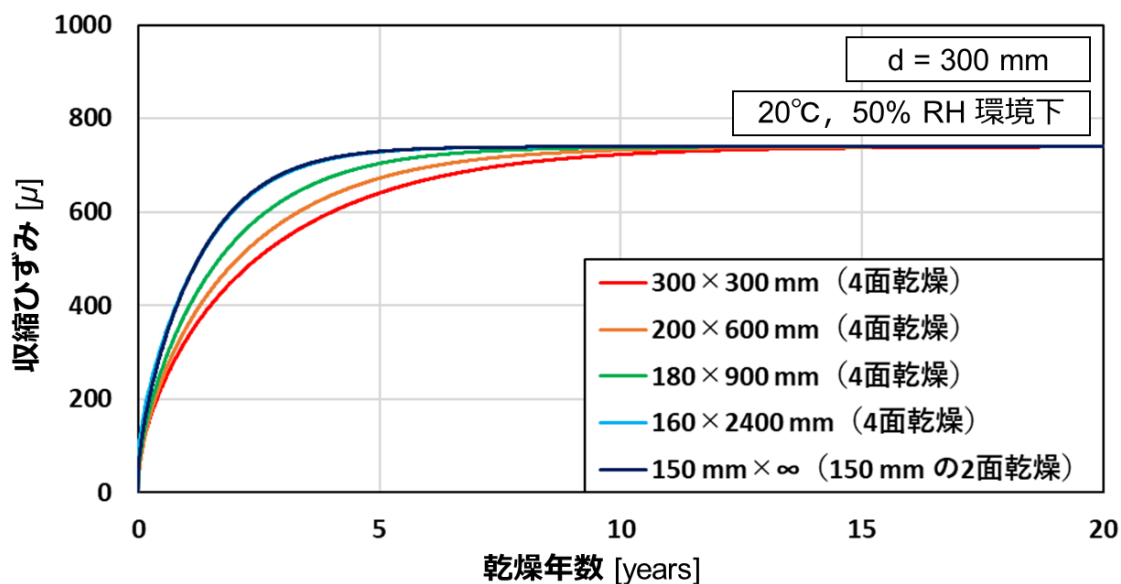


図 4.15 解析ケース B の長期収縮解析結果

#### 4.6 第4章のまとめ

本章では、本研究で用いる数値解析手法が寸法の異なる場合においても適用可能であるかどうかを確認することを目的とし、実験結果と数値解析結果を比較することで検討した。また適用性の確認後、寸法および形状が収縮挙動に与える影響について、暴露実験および数値シミュレーションによって検討した。第4章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 寸法の違いが水分移動に及ぼす影響は今回の検討では確認されず、数値解析において同一の材料パラメータを用いて各寸法の実験結果を再現可能であった。
- (2) 寸法の違いは収縮の時間変動量に影響し、寸法が大きいほど変動量が小さくなることを暴露実験および数値シミュレーションによって示した。
- (3) 暴露環境が同一であれば、寸法によらず収縮の進行が収束した時点での平均収縮ひずみは同一になることを数値シミュレーションによって示した。
- (4) 部材の形状により、受ける環境作用が異なる面が存在する場合には、同一の暴露環境条件であっても平均収縮ひずみは一致しないことを数値シミュレーションによって示した。
- (5) 有効部材厚が同一であれば、寸法や形状の異なる部材であっても収縮の経時変化は同様の挙動となることを示した。しかし、隅角部の多い部材や扁平な部材については収縮の進行が早くなる可能性がある。

#### 第4章の参考文献

- [4.1] 和田宣史, 佐藤良一, 袖山隆行, 雪田憲子: コンクリートのクリープ・収縮の寸法依存性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 21, No. 2, pp.769-774, 1999
- [4.2] 小林仁, 先本勉, 藤井隆史, 綾野克紀, 宮川豊章: 乾燥収縮ひずみに与える部材寸法の影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 4, pp.377-389, 2013
- [4.3] 宮澤伸吾, 黒井登起雄, 松村仁夫: 高強度コンクリートの収縮に及ぼす供試体寸法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 2, pp.613-618, 2000
- [4.4] 宮澤伸吾, 黒井登起雄, 松村仁夫: 高強度コンクリートの収縮ひずみに及ぼす相対湿度および供試体寸法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp.715-720, 2001
- [4.5] 太田光貴, 中山紘紀, 兵頭彦次, 佐藤良一: 高収縮コンクリートの収縮特性と寸法依存性について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp.569-574, 2011
- [4.6] 半坂昌広, 寺西浩司: 部材寸法・形状および相対湿度がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp.481-486, 2005
- [4.7] 綾野克紀, 藤井隆史: コンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値に養生時の温度履歴が与える影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 70, No. 4, pp.428-440, 2014

## 第5章 屋外における各環境作用がコンクリートの乾燥収縮挙動に及ぼす影響に関する数値実験

### 5.1 はじめに

第2章および第4章において示した屋外暴露実験の結果は、温度、湿度、日射、降雨のすべての環境作用の影響を受けた結果として観測されたものである。そのため、個々の環境作用がどの程度収縮に影響しているのかを実験結果から判断することはできない。

そこで本章では、第3章で示した、精度が確認された解析手法を用いて、屋外のコンクリート部材の収縮挙動に及ぼす日射および降雨それぞれ単独の影響について、数値解析の結果から検討する。共通暴露実験を行った4地点について、すべての環境作用を考慮した解析結果との差異を比較することによって日射および降雨の影響をそれぞれ抽出した。どの環境作用が収縮挙動に強く影響しているのかを把握し、収縮予測において考慮すべき環境作用であるかについて検討する。

### 5.2 各環境作用が乾燥収縮に及ぼす影響に関する感度解析

#### 5.2.1 日射の影響

外部環境作用として、日射、温度湿度の変動、降雨の影響のすべてを考慮した解析結果と、このうち日射の影響のみを考慮しない解析結果との比較を図5.1に示す。いずれの地点においても日射を考慮しないことで収縮ひずみが少し小さくなっているが、解析結果に大きな違いは見られなかった。日射によるコンクリートの温度変化は日中における一時的なものであるため、乾燥を著しく促進させるものではなかったと推察される。夏期におい

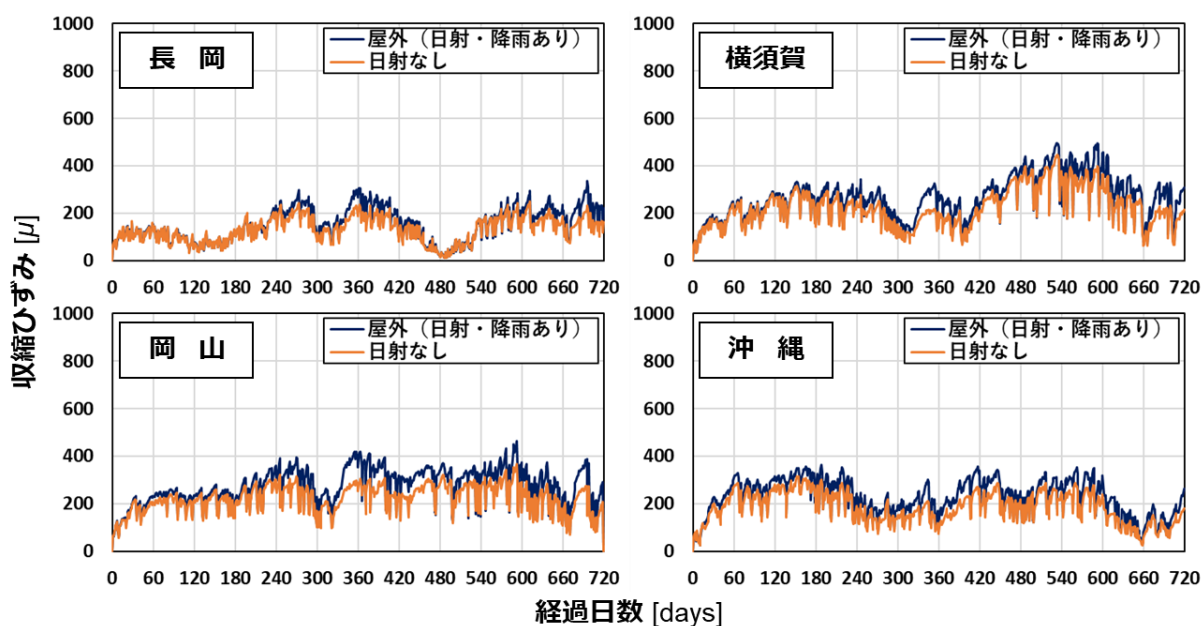


図 5.1 日射を考慮する場合と考慮しない場合の収縮ひずみ解析の比較

では結果に差が少し出ているため、降雨が少なく日照時間が長い季節には影響が大きくなると考えられる。

### 5.2.2 降雨の影響

外部環境作用として、日射、温度湿度の変動、降雨の影響のすべてを考慮した解析結果と、このうち降雨の影響のみを考慮しない解析結果との比較を図 5.2 に示す。いずれの地点においても降雨を考慮しないことにより収縮ひずみが増大していることがわかる。しかし、横須賀・岡山・沖縄の3地点の結果については、降雨の考慮の有無による違いは長岡と比較して小さかった。この理由として、降雨時間中は湿度が上昇するため、降雨による吸水を直接考慮しなくても、吸湿のみである程度乾湿の傾向が表現できたためと考えられる。各地の降雨発生時における湿度の平均値を算出すると、表 5.1 に示すような結果となった。どの地点も降雨時の湿度は平均湿度より高くなっている。

一方、長岡の結果については降雨の影響を直接考慮するかどうかによって結果が大きく異なっている。実験で確認された冬期における収縮の停滞は、降雨を考慮しない解析では再現できなかった。各地点の降雨特性に着目すると、長岡は他の3地点よりも降雨時間が

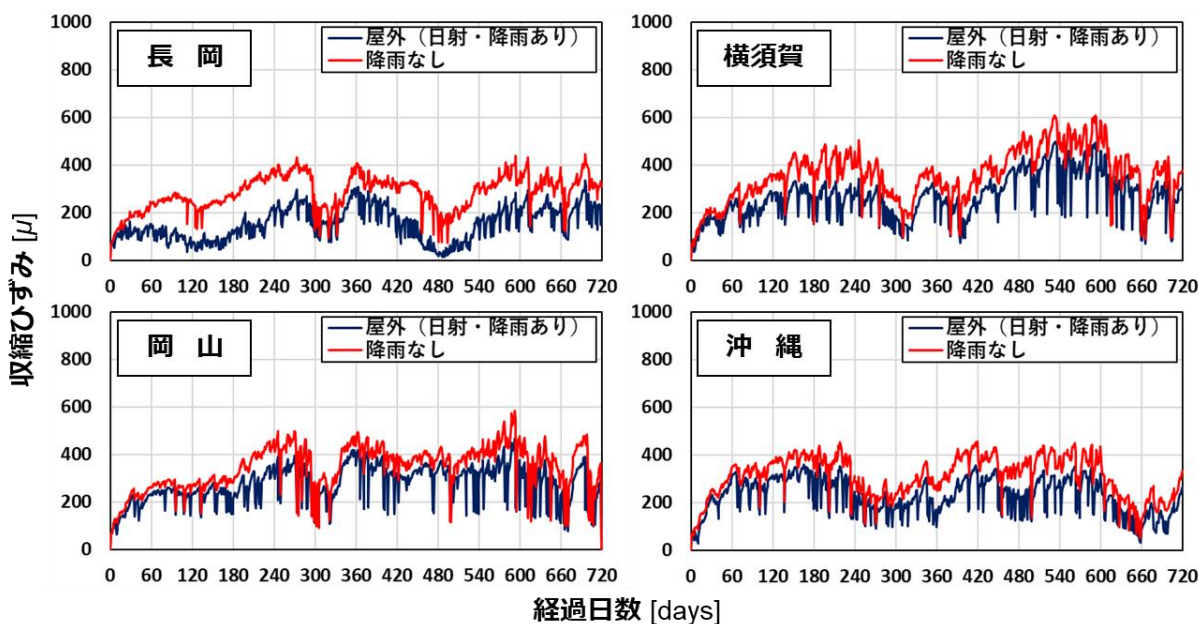


図 5.2 降雨を考慮する場合と考慮しない場合の収縮ひずみ解析の比較

表 5.1 各地の降雨特性および降雨発生時の平均湿度

	暴露期間中の 平均湿度	年間降雨時間 [h]	年間降水量 [mm]	降雨発生時の 平均湿度
長 岡	75.2 %	1453	2229	92.1 %
横須賀	68.9 %	730	1754	92.2 %
岡 山	71.3 %	574	1136	93.1 %
沖 縄	77.5 %	770	2639	91.8 %

2倍近く長い。このため、降雨の影響を他の3地点よりも強く受けており、収縮挙動を適切に再現するには降雨による吸水の影響も考慮する必要があると考えられる。

以上の検討結果から、収縮予測における降雨の影響は湿度の時間変動のみでもある程度表現できるが、降雨時間の割合が多い地点では降雨による吸水の影響を考慮するのがよいことが明らかとなった。

### 5.3 湿度の時間変動が収縮に及ぼす影響に関する検討

5.2節の感度解析によって、湿度の時間変動を実測に基づいて与えることで、屋外のコンクリートの収縮挙動が概ね再現できることが示された。

本節では、湿度の時間変動を忠実に考慮する場合と平均値で考慮する場合との差異を数値解析によって検討する。そのための基礎的検討として、湿度の変動を一定の振幅および周期をもつ正弦波で与えた数値解析を行い、湿度の時間変動が収縮に及ぼす影響に関する基本的傾向について考察する。

#### 5.3.1 湿度の時間変動を考慮した場合の結果と一致する一定湿度の同定

まず、日射および降雨を考慮しない解析について、長岡の気象データを用いて温度を年平均値の一定値、湿度について時間変動を考慮した場合の解析と、温湿度の両方を年平均値の一定値で考慮した場合の解析を実施した。その結果を図5.3に示す。長岡の場合、湿度を一定で考慮した場合の解析は湿度変動を考慮した結果よりも収縮ひずみが大きくなることがわかる。

次に、湿度の変動を考慮した場合の収縮ひずみの解析結果の時間平均値を求め、これと等価な解析結果を算出する一定湿度の入力値を、パラメータスタディによって同定する。その結果は図5.4に示すとおりである。湿度の変動を考慮した場合の収縮ひずみは、1年目と2年目で大きな変化は見られず、定常状態になっていると考えられる。そのため、乾燥期間が1年以上であれば、乾燥日数が増減しても同定される一定湿度に影響しないとみなし、2021年8月時点までのデータを使用して一定湿度を同定した。長岡の場合は、湿度を82.5%とすることで概ね一致することが明らかとなった。このことから、湿度の時間変動がある場合は、等価な収縮ひずみの解析結果を算出する入力湿度は、必ずしも湿度の平均値ではないということがわかる。

同様の検討をほかの3地点の気象データを用いて実施した結果を図5.5に示す。いずれの地点においても、一定湿度を与えて精度の高い解析結果の平均値と等価な解析結果を算出するには、年平均湿度よりも高い湿度を与える必要があることが明らかとなった。

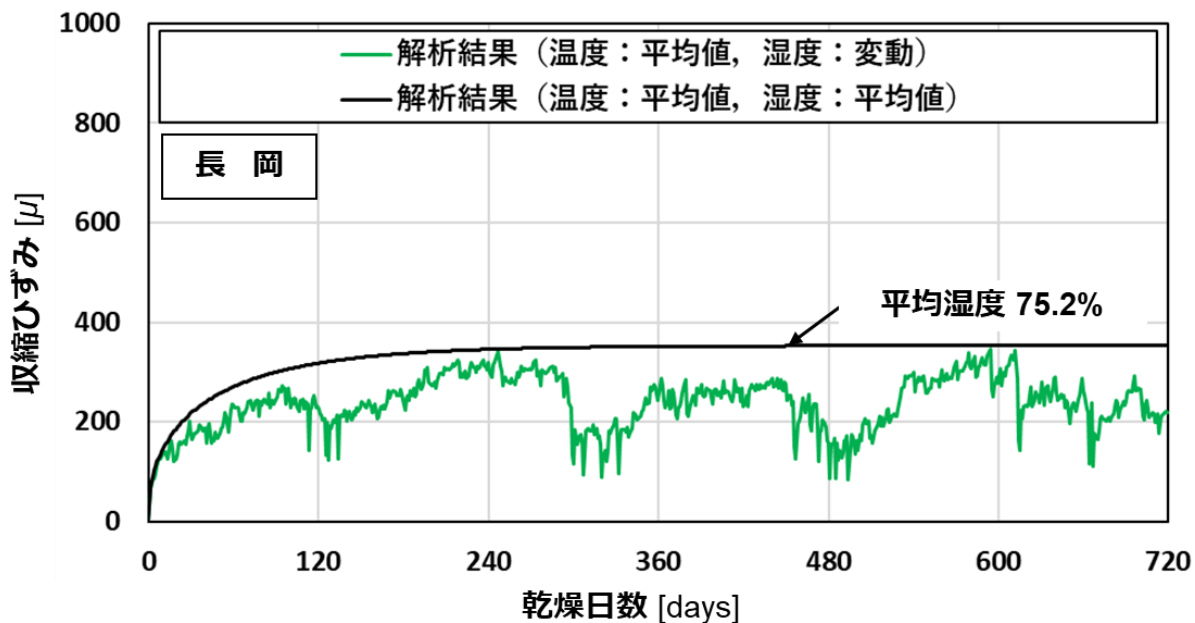


図 5.3 湿度変動を考慮した場合と湿度一定の場合の差異

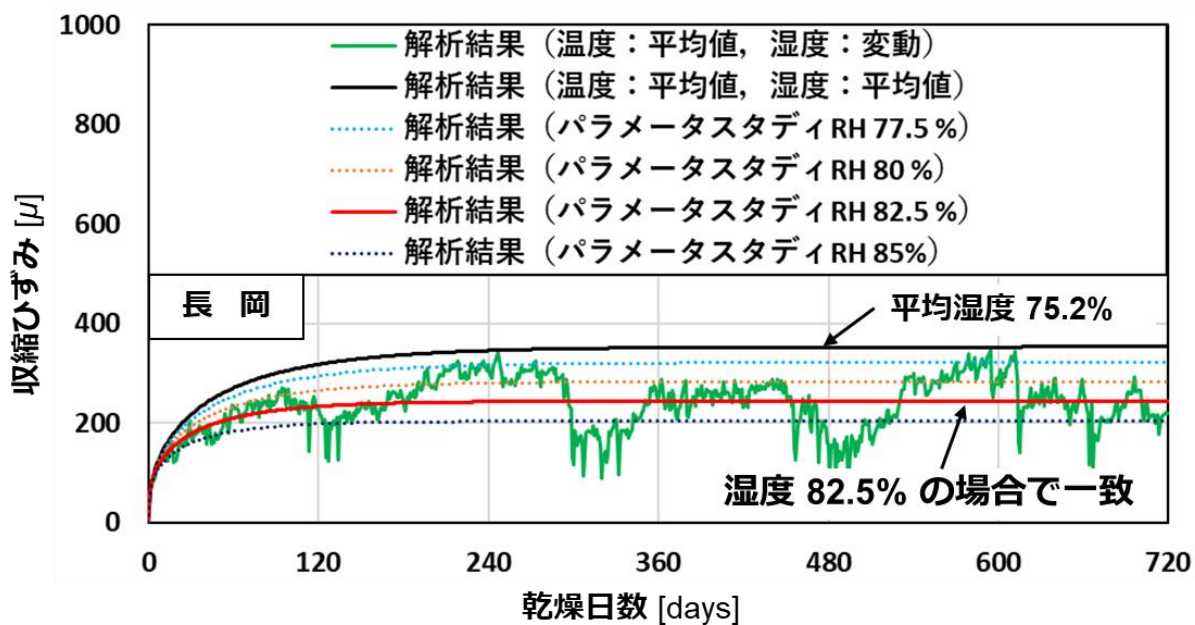


図 5.4 湿度変動を考慮した結果と一致する一定湿度の同定 (長岡)

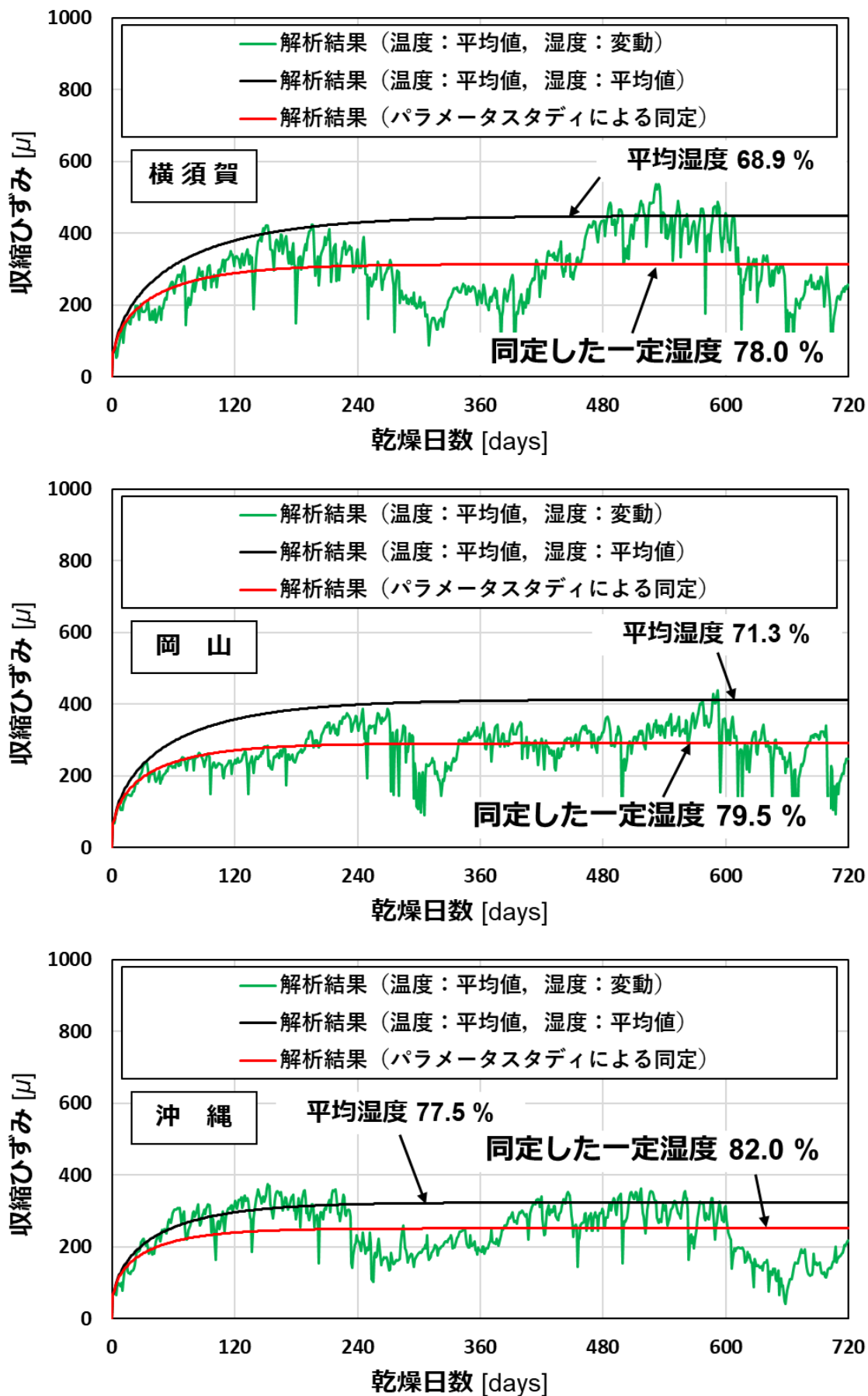


図 5.5 湿度変動を考慮した結果と一致する一定湿度の同定 (横須賀・岡山・沖縄)



### 5.3.2 コンクリートの水分平衡特性の非線形性の観点からの検討

湿度変動がある場合、平均湿度を与えても収縮ひずみの平均値を算定できない原因は、コンクリートの水分平衡特性、すなわち相対湿度と相対液状水量（＝相対含水率）の関係の非線形性にあると考えている。コンクリートの水分平衡特性は、コンクリートの細孔構造に依存した材料特性であり、使用材料や配合、材齢によって変化する[5.1][5.2][5.3][5.4]。本検討では、第1章および第3章に示した数値計算プログラムを用いて、今回の実験に用いたコンクリートの水分平衡特性を算出した。その結果を図5.6に示す。相対湿度70%以上の高湿度領域においては相対湿度－相対液状水量関係の非線形性が強くなる。そのため、この範囲で湿度変動がある場合では、湿度の平均値を与えて算出したコンクリートの含水量と、実際の含水量の時間平均値との乖離が生じる。その結果、収縮ひずみの推定値も実際の収縮ひずみの時間平均値と一致しない。

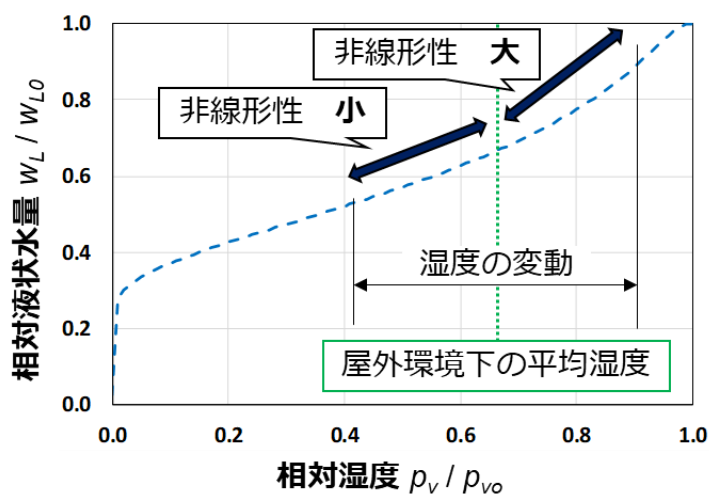


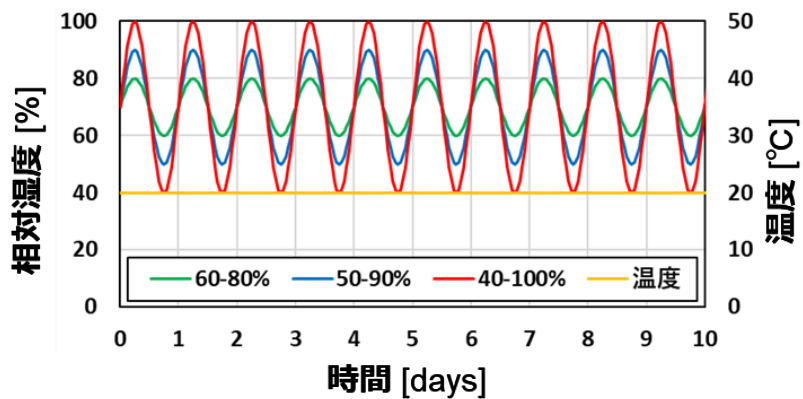
図 5.6 数値解析を行ったコンクリートの水分平衡特性

上記の仮説の妥当性を検証するためと、湿度の変動が収縮に及ぼす影響について系統的な知見を得るために、湿度の変動の振幅と中央値（平均値）をパラメータとした数値実験を行った。解析ケースを表5.2に示す。湿度変動の周期については、水分量の変化に影響しないことを、周期を1日、3日、7日としたパラメータスタディによって確認した。そのため、今回の検討においては周期を1日の固定値として計算を行った。コンクリートの温度は20℃の一定値とした。

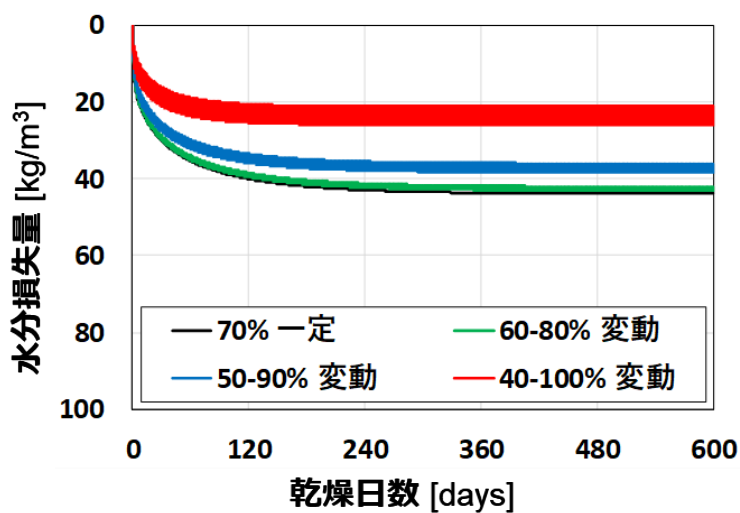
表 5.2 湿度変動の影響に関する解析ケース

解析ケース	湿度の中央値	湿度変動量	周期
A	70 %	±10 %	1 day
		±20 %	
		±30 %	
B	50 %	±10 %	
		±20 %	
		±30 %	

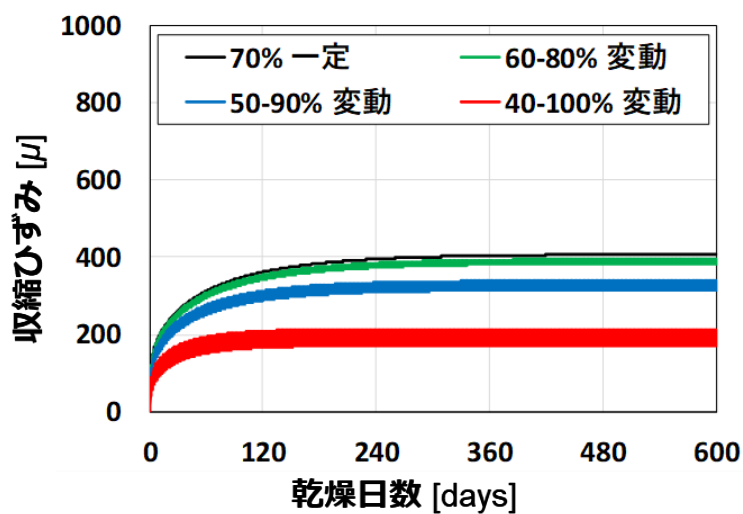
解析結果を図 5.7 および図 5.8 に示す。解析シリーズ A および B の結果から湿度変動幅と中央値（平均値）が収縮に及ぼす影響について考察する。高湿度域におけるシリーズ A の結果では、湿度の中央値が 70%で同じであっても湿度の変動幅が大きくなるほど水分損失量が小さくなり、それに伴い収縮ひずみも小さくなっていることがわかる。一方、中湿度域のシリーズ B では、湿度の変動幅が水分損失量や収縮ひずみの平均値に及ぼす影響はシリーズ A よりも小さい。これは図 5.3 に示したコンクリートの水分平衡特性が、湿度 50%の近辺では線形性が高いためであると考えられる。このことから、湿度領域によって収縮挙動に及ぼす湿度変動の影響が異なるといえる。



(a) 解析に用いた湿度の時間変動

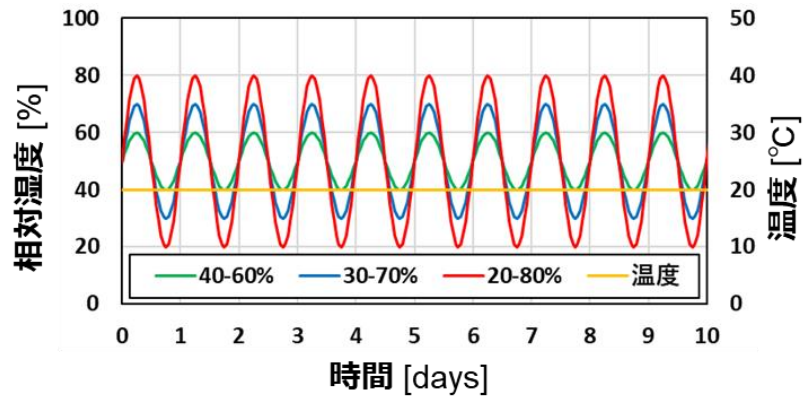


(b) 水分量の経時変化

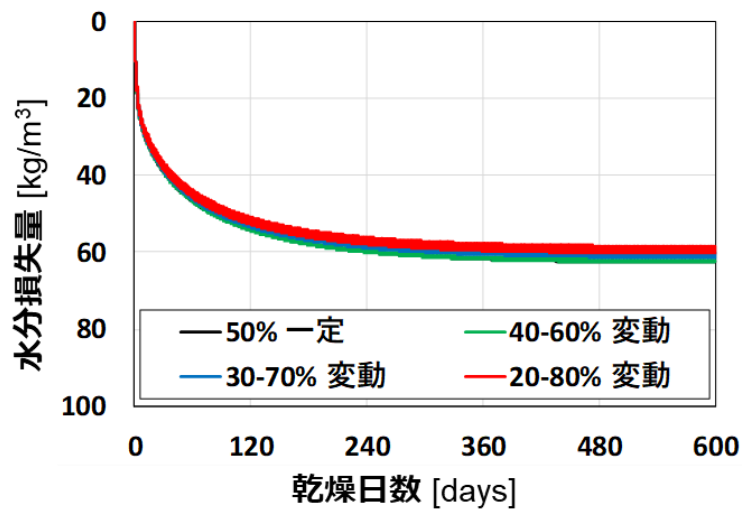


(c) 収縮ひずみの経時変化

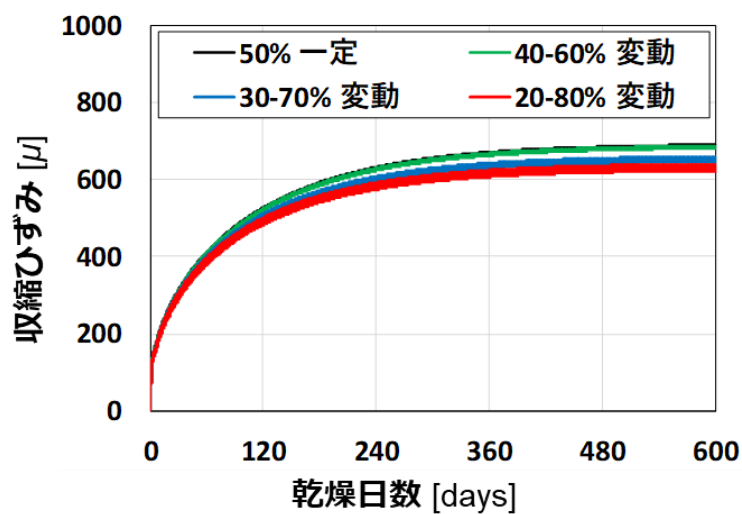
図 5.7 湿度の変動量が収縮挙動に及ぼす影響に関する感度解析 (解析ケース A)



(a) 解析に用いた湿度の時間変動



(b) 水分量の経時変化



(c) 収縮ひずみの経時変化

図 5.8 湿度の変動量が収縮挙動に及ぼす影響に関する感度解析（解析ケース B）

### 5.3.3 湿度変動の影響を考慮する係数の定式化

前項までの検討より、高湿度環境下のコンクリートの収縮を一定値の湿度を与えて予測するためには、平均湿度よりも高い湿度を与える必要があることが明らかとなった。そこで、平均湿度からどの程度割り増すことで同等の結果を得ることができるのか、パラメータスタディによって湿度変動の影響を考慮する係数を同定する。

屋外環境下での大きな湿度変動は、降雨時間帯における高湿度が主たる要因である。そのため、湿度変動を考慮することで間接的に降雨の影響も考慮することになる。また、表 5.1 によれば、降雨の時間帯における湿度はどの地点でも 92 ~ 93%程度であった。これらを考慮して決定した解析ケースを表 5.3 に示す。中央値をパラメータとし、湿度の最大値が降雨時の湿度を想定した 93%となるように変動量を設定した。以上の条件のもと、湿度が変動する環境下の収縮ひずみを各平均湿度の場合について計算した。

次に、時間平均ひずみを指標として、上記の解析結果と等価な結果をもたらす一定湿度をパラメータスタディによって同定した。その結果を図 5.9 に示す。平均湿度が低いほど、入力する湿度を平均値よりも大きくする必要があることがわかる。

表 5.3 湿度変動を考慮する係数の算出に関する解析ケース

解析ケース	湿度の中央値	湿度変動量	周期
湿度変動なし	93 %	0 %	1 day
湿度変動あり	90 %	±3 %	
	80 %	±13 %	
	70 %	±23 %	
	60 %	±33 %	

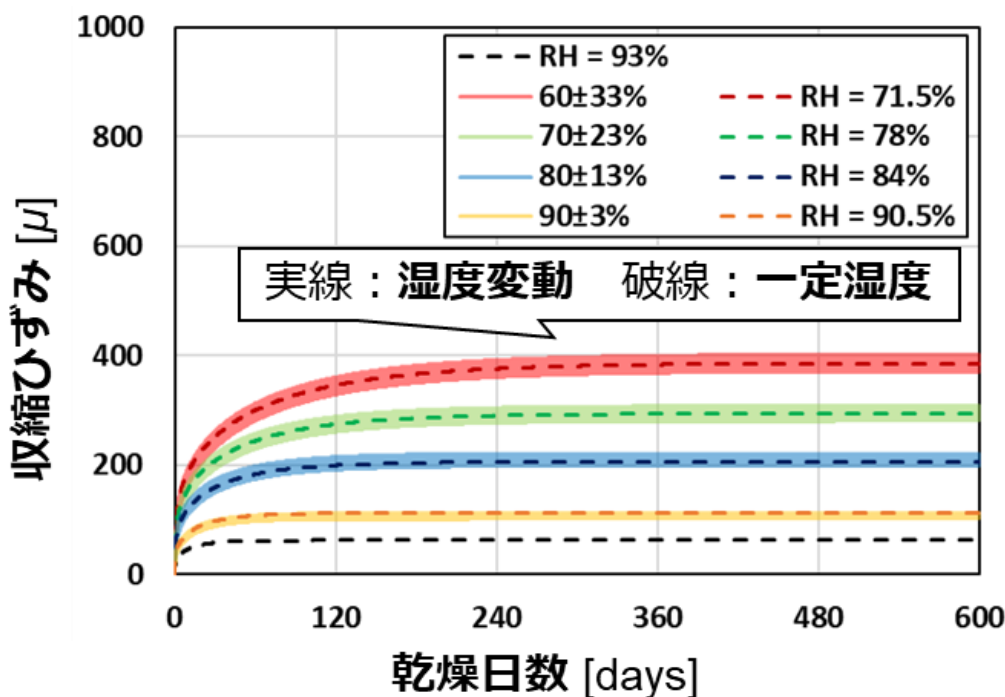


図 5.9 湿度変動を考慮した結果と一致する一定湿度の同定

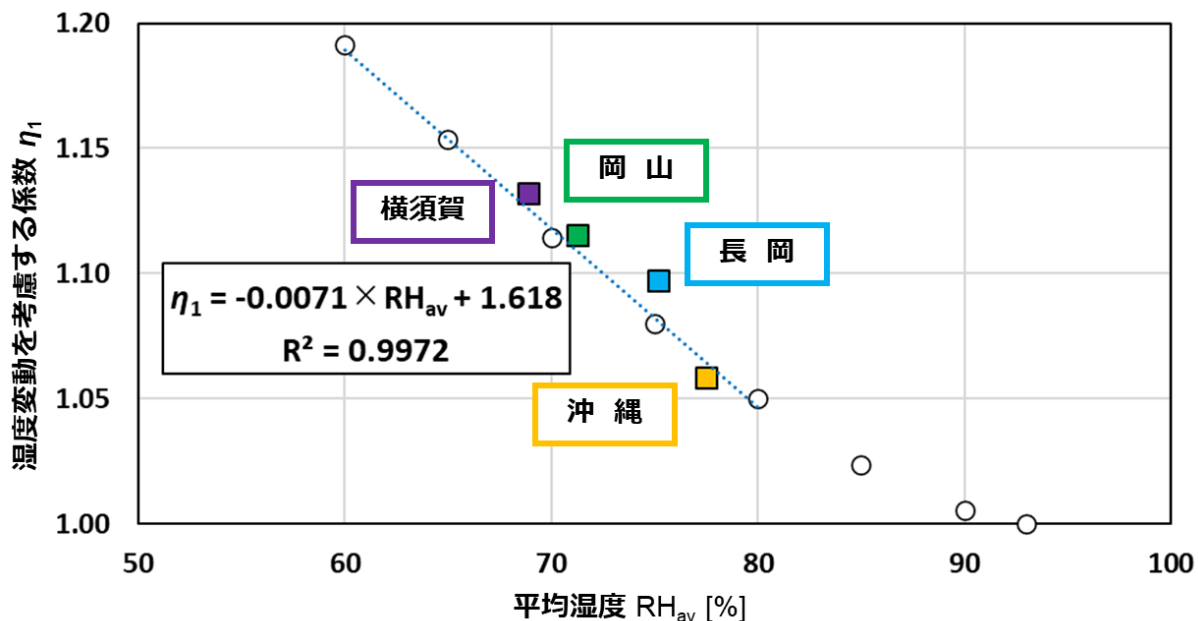


図 5.9 湿度変動を考慮した結果と一致する一定湿度の同定

同定した湿度を平均湿度で除した値を、湿度変動を考慮するための係数  $\eta_1$  とし、平均湿度との関係をプロットした結果が図 5.10 である。表 5.3 の解析ケースに加え、同様の解析を湿度の中央値が 65, 75, 85 % の場合でも実施した。また、5.3.1 項で算出した、各実験地点の気象データから算出した係数もあわせて示す。屋外環境下で考えられる平均湿度である 60 ~ 80 % の範囲では、平均湿度と  $\eta_1$  はほぼ線形の関係であり、回帰式により式(5.1)で表すことができる。

$$\eta_1 = -0.0071 \times RH_{av} + 1.618 \quad (5.1)$$

ここに、 $\eta_1$  : 湿度変動の影響を考慮するための係数

$RH_{av}$  : 構造物の置かれる環境の平均湿度 [%]

である。

5.3.1 項の検討において実際の温湿度データから求めた各地点の係数についても、同様の傾向を示している。このことから、この関係は、屋外における湿度の時間変動を考慮するために湿度を見かけ上大きくする係数  $\eta_1$  を算出する実験式として、ある程度の適用性があると考えられる。

## 5.5 第5章のまとめ

第5章では、精度が確認された数値解析手法を用いて、屋外のコンクリート部材の収縮挙動に及ぼす日射および降雨それぞれ単独の影響について、数値解析の結果から検討した。どの環境作用が収縮挙動に強く影響しているのかを把握し、収縮予測において考慮すべき環境作用であるかについて検討するとともに、その影響を考慮する手法について提案した。第5章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 日射による乾燥の促進が収縮挙動に及ぼす影響は小さくなく、降雨による吸水によって収縮挙動が大きく異なる地点があった。
- (2) 日射や降雨を考慮しなくても、湿度の時間変動を実測に基づいて与えることで、屋外のコンクリートの収縮挙動が概ね再現できる。
- (3) コンクリートの水分平衡特性が非線形性であるため、湿度変動がある場合では平均湿度を与えても収縮ひずみの平均値を算定できない。一定湿度を与えて精度の高い解析結果の平均値と等価な解析結果を算出するには、年平均湿度よりも高い湿度を与える必要がある。
- (4) 屋外における湿度の時間変動を考慮するために湿度を見かけ上大きくする係数を算出する手法を提案し、ある程度の適用性がある可能性を示した。

## 第5章の参考文献

- [5.1] 磐田吾郎, 石田哲也: 任意の温度条件下における無機複合材料の水分平衡特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No.1, pp.515-520, 2003
- [5.2] 伊代田岳史, 魚本健人: 早期脱型による乾燥と水分の再供給がコンクリートの内部組織構造に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No.2, pp.787-792, 2001
- [5.3] 楠原千佳子, 石田哲也, 前川宏一: セメント硬化体中に存在する液状水量の温度依存性と時間効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No.1, pp.579-584, 2004
- [5.4] 角田洋, 大下英吉: 乾湿変化によるセメントペーストの体積変化に及ぼす温度依存挙動に関する研究, Vol. 27, No.1, pp.445-450, 2005



## 第6章 乾燥収縮予測式を用いて屋外環境下のコンクリート部材の乾燥収縮挙動を予測する手法の提案

### 6.1 はじめに

これまでの実験および数値解析による検討から、湿度の時間変動を実測に基づいて与えることで、屋外のコンクリートの収縮挙動が概ね再現できること、屋外における湿度の変動を考慮する係数を算出する実験式について、ある程度の適用性が示された。

本章では、現行の土木学会の乾燥収縮予測式[6.1]において、屋外の環境作用の影響を見かけの相対湿度によって考慮し、屋外のコンクリート部材の収縮を予測する手法について提案し、その適用性を検証する。

### 6.2 恒温恒湿環境下における収縮試験の結果と予測式との比較

第2章に示した共通暴露実験において、恒温室内に静置した試験体の乾燥収縮ひずみの経時変化と乾燥収縮予測式との関係を図6.1に示す。乾燥収縮予測式に入力するRHは恒温室内の平均湿度である50%、有効部材厚 $d$ は全面乾燥であるため100mmとした。恒温室内での収縮の経時変化は、乾燥収縮予測式で良好に再現できていることがわかる。また、数値解析の結果ともよく一致していることがわかる。

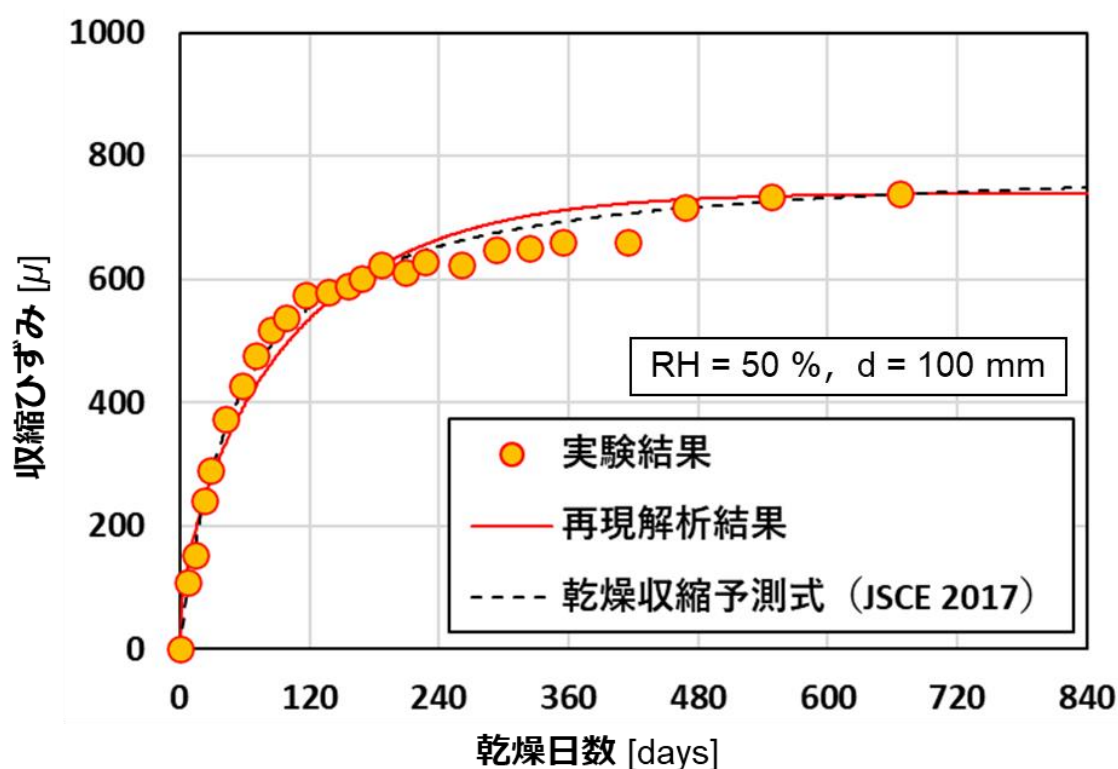


図 6.1 湿度変動を考慮した結果と一致する一定湿度の同定

### 6.3 環境作用の影響を考慮する係数の導入による実験結果の再現

#### 6.3.1 湿度の時間変動の影響を考慮する係数

第5章で提案した湿度変動の影響を考慮する係数を平均湿度に乗じた相対湿度を見かけの相対湿度とする。その値を乾燥収縮予測式に用いることで、第2章に示した暴露実験結果を再現できるか検証する。乾燥収縮予測式にには、各地点の平均湿度  $RH_{av}$  の代わりに式(6.1)から算出される見かけの相対湿度  $RH_{ap}$  を用いる。湿度変動の影響を考慮する係数  $\eta_1$  は、第5章で提案した実験式である式(5.1)を用いて算出した。

$$RH_{ap} = \eta_1 \times RH_{av} \quad (6.1)$$

ここに、 $RH_{ap}$  : 見かけの相対湿度 [%]  
である。

式(6.1)で算出される相対湿度を乾燥収縮予測式に用いる  $RH$  の入力値として、各地点の収縮ひずみの経時変化を求める。結果を図 6.2 に、算出した各地の見かけの相対湿度を表 6.1 に示す。従来の方法である平均湿度を適用する場合よりも実験値の中央値により近い値を算定することができることがわかる。しかし、長岡の実験結果については、湿度変動の影響を考慮するだけでは実験値の中央値に近い値を算定することができなかった。第5章で検討したように、他の地点よりも降雨時間の長い長岡では降雨の影響を直接考慮する必要があると考えられる。

表 6.1 算出した各地の見かけの相対湿度

	暴露期間中の 平均湿度	算出した 見かけの相対湿度
長 岡	75.2 %	81.5 %
横須賀	68.9 %	77.8 %
岡 山	71.3 %	79.3 %
沖 縄	77.5 %	82.8 %

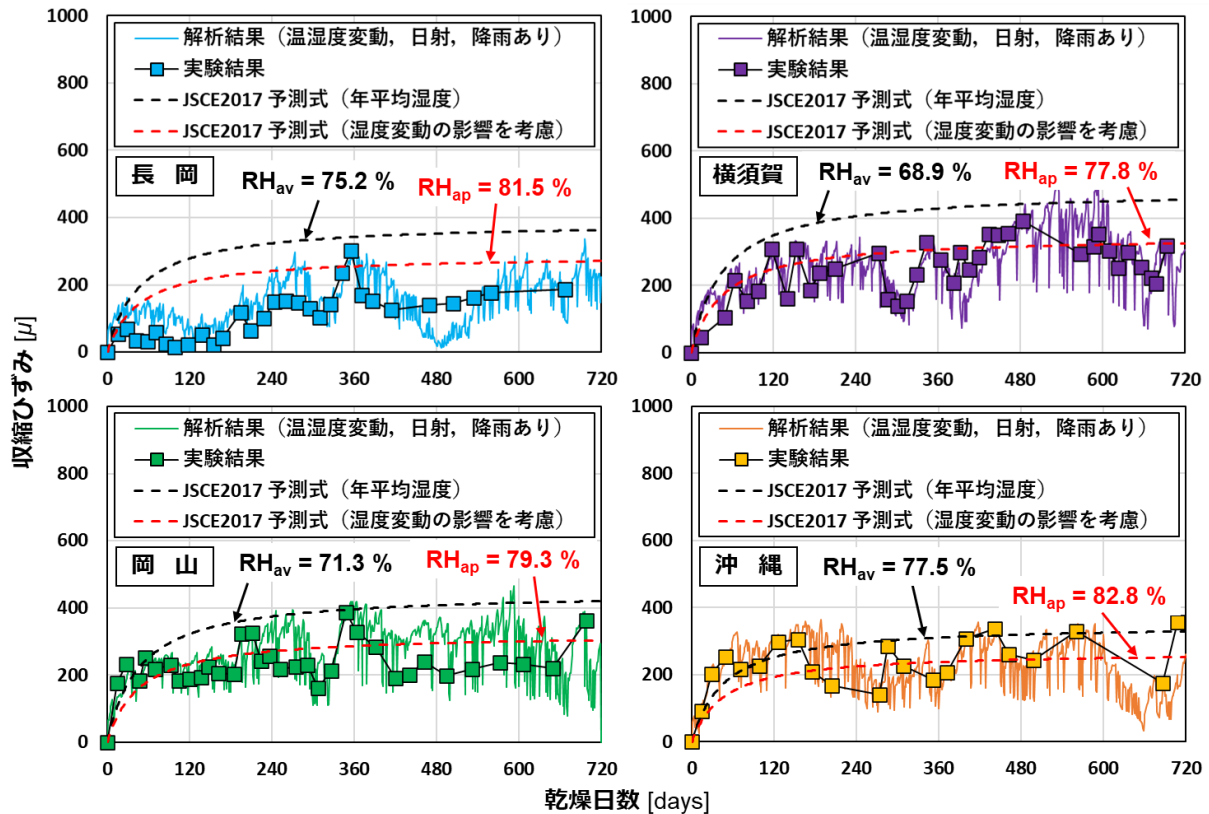


図 6.2 湿度変動を考慮した結果と一致する一定湿度の同定

### 6.3.2 降雨の影響を考慮する係数

前項の検討により、降雨時間の長い地点は、湿度変動の考慮による間接的な降雨の影響に加えて、降雨の影響を直接考慮する必要があることが示された。

そこで、時間平均ひずみを指標として、実験結果および第5章で検討したすべての環境作用を考慮した場合の解析結果を用いて、それらと等価な結果となる相対湿度を算出した。その結果を表 6.2 に示す。長岡では RH を 88.5 % とすることで一致し、湿度変動の影響を考慮した値よりもさらに高い値を入力値とする必要がある。ほかの地点についても、沖縄ではほとんど値に差はなかったものの、湿度変動を考慮した湿度よりもさらに大きな値とすることでさらに実験結果に近づくことがわかる。

表 6.2 降雨の影響の考慮に必要な湿度の同定

実験地点	実験結果と等価な結果となる一定湿度 RH'	湿度変動を考慮した値との比 $\eta_2$ $\eta_2 = \frac{RH'}{\eta_1 \cdot RH_{av}}$	降雨時間割合 $p_{rain}$
長岡	88.5 %	1.080	0.171
横須賀	80.5 %	1.035	0.083
岡山	80.0 %	1.009	0.065
沖縄	83.0 %	1.002	0.088

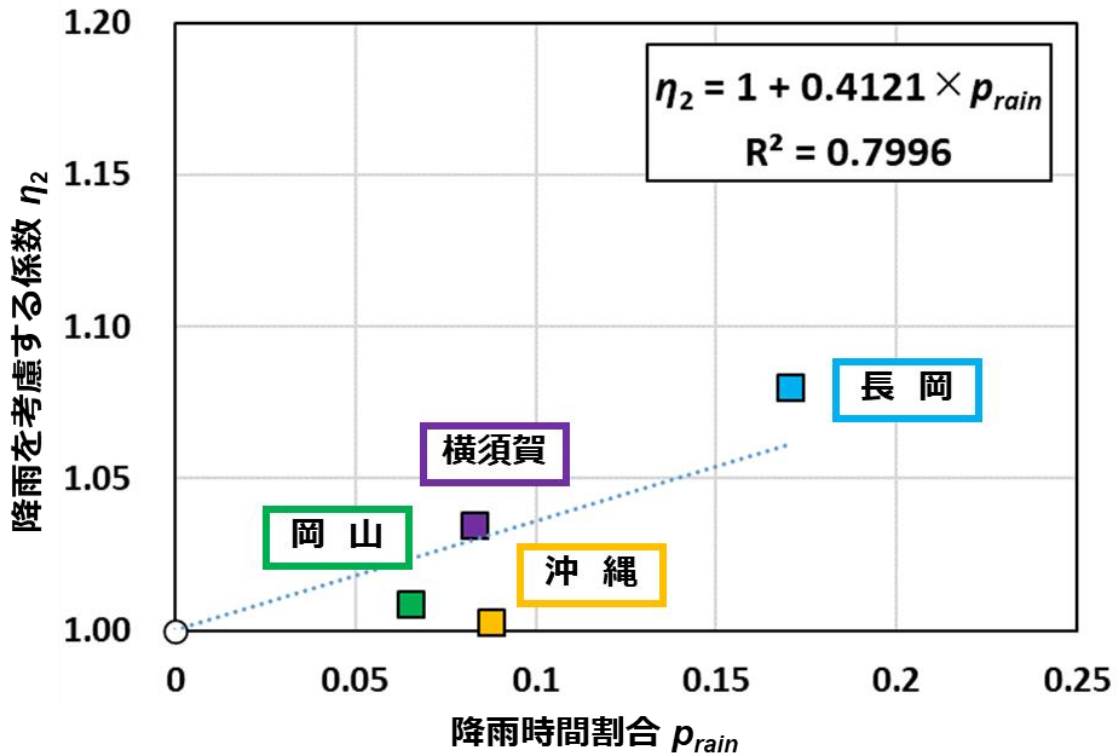


図 6.3 各地の降雨時間割合と  $\eta_2$  の関係

湿度変動を考慮した場合の湿度と実験結果と等価な結果となる湿度との比が、まだ考慮されていない降雨の影響だと考え、降雨の影響を表す係数を算出する。表 6.2 に示した実験結果と等価な結果となる湿度と湿度変動を考慮した湿度との比を降雨の影響を考慮する係数  $\eta_2$  とする。降雨時間割合を 1 年間において降雨が生じている時間の割合と定義し、年間降雨時間の割合と  $\eta_2$  との関係を表したものが図 6.3 である。各地の降雨時間割合は各地の 2 年間の総降雨時間から算出した。

降雨時間の割合と  $\eta_2$  が線形関係であると仮定すれば、降雨の影響を表す  $\eta_2$  は式(6.2)の回帰式によって表すことができる。

$$\eta_2 = 1 + 0.4121 \times p_{rain} \quad (6.2)$$

ここに、 $\eta_2$  : 降雨の影響を考慮するための係数

$p_{rain}$  : 降雨時間割合

である。

以上の検討より、各地の降雨時間割合に応じて降雨を考慮する係数を算出し、湿度変動を考慮した湿度に乗じることで屋外環境下において収縮に影響を及ぼす環境作用である湿度変動および降雨の影響をそれぞれ考慮することが可能となる。

最後に、湿度変動の影響と降雨の影響を考慮する係数を平均湿度に乗じた見かけの相対湿度を乾燥収縮予測式に適用することで、実験結果を再現できるかを改めて検証する。乾燥収縮予測式に入力する RH として、平均湿度の代わりに式(6.3)から算出される見かけの相対湿度  $RH_{ap}$  を用いる。

第6章 乾燥収縮予測式を用いて屋外環境下のコンクリート部材の乾燥収縮挙動を予測する手法の提案

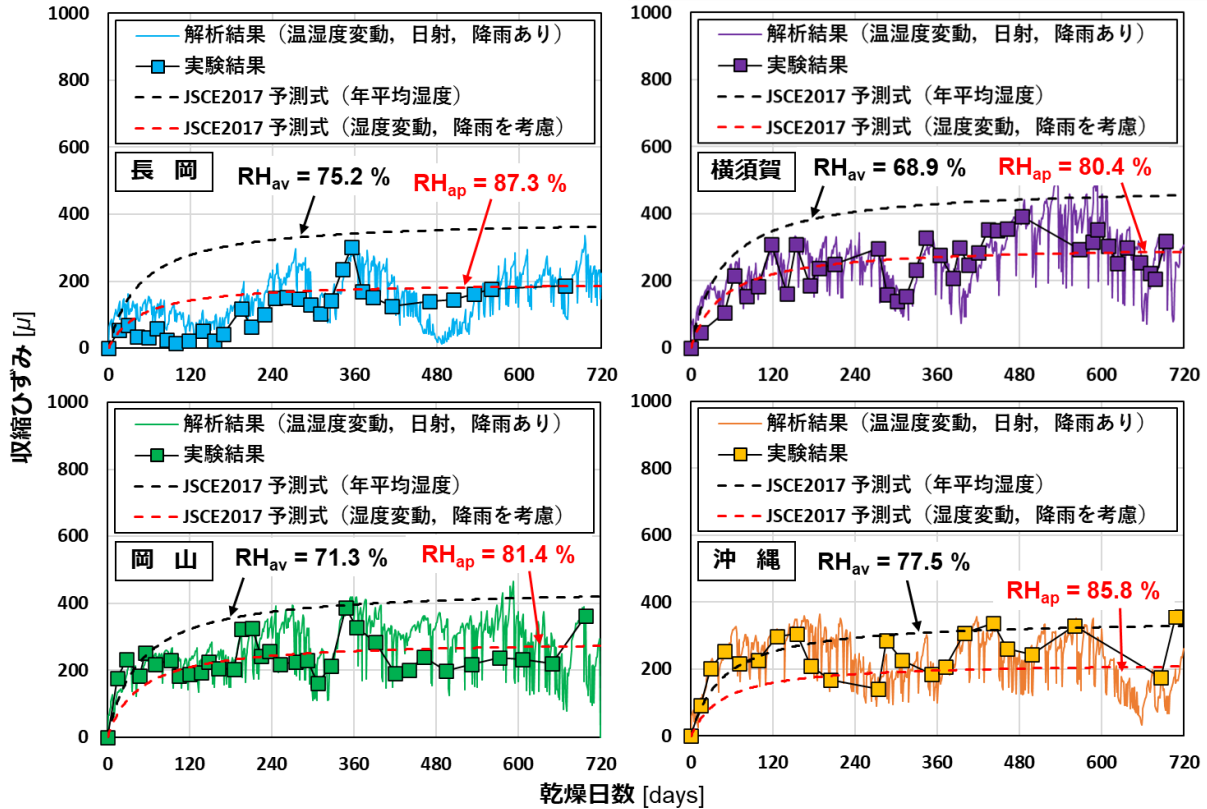


図 6.4 湿度変動と降雨を考慮した結果と一致する一定湿度の同定

表 6.3 算出した各地の見かけの相対湿度

	暴露期間中の 平均湿度	算出した 見かけの相対湿度
長岡	75.2 %	87.3%
横須賀	68.9 %	80.4 %
岡山	71.3 %	81.4 %
沖縄	77.5 %	85.8 %

$$RH_{ap} = \eta_1 \times \eta_2 \times RH_{av} \quad (6.3)$$

結果を図 6.4 に、式(6.3)を用いて改めて算出した各地の見かけの相対湿度を表 6.3 に示す。すべての地点において実験結果の中央値に近い値を算出する予測ができるようになった。以上の検討により、湿度変動を考慮する係数と降雨の影響を考慮する係数を乾燥収縮予測式に導入することで、気候特性の異なる各地の平均収縮ひずみを簡易的に予測することが可能となった。

## 6.4 部材寸法が収縮ひずみの最大値に与える影響に関する検討

前項までの検討より、2017年制定コンクリート標準示方書において導入された見かけの相対湿度に関して、物理的意味を明らかにし、有効性を検証し、具体的な値の定め方について示すことができた。しかし、部材寸法の影響についてはまだ考慮されていない。

第4章に示した検討より、構造物の置かれる環境が同じである場合、最終的な平均収縮量は部材寸法によらず同一であり、収縮の時間変動量については寸法が大きくなるほど小さくなることを示した。乾燥収縮予測の応用として、収縮ひび割れの発生予測が挙げられる。ひび割れは収縮が大きく進行した際に生じると考えられ、その最大値は時間変動量によって異なるため、部材寸法の影響を受ける。

本検討では、乾燥収縮予測式を用いて収縮ひずみの最大値を予測することを考える。前項までで検討した見かけの相対湿度は収縮ひずみの平均値を算出した場合の値であり、最大値を予測する際には異なるRHを入力する必要がある。そこで、数値解析によって算出した屋外環境下の収縮ひずみの結果を用いて、解析結果の最大値と一致する予測式に適用するRHの入力値をパラメータスタディによって算出し、有効部材厚との関係性について検討した。

解析ケースを表6.4に示す。4水準の有効部材厚について屋外環境下における収縮ひずみの長期解析を実施した。環境条件として横須賀の気象データを用いた。

表 6.4 部材寸法が収縮ひずみの最大値に与える影響に関する解析ケース

断面形状	有効部材厚 [mm]	乾燥条件	環境条件
矩形断面	100	4面乾燥	屋外環境下 (横須賀の気象データ) 2019.09 ~ 2021.08
	200		
	300		
	600		

解析結果の最大値と一致するように予測式に適用するRHの入力値をパラメータスタディによって算出した結果を図6.5に示す。同定されたRHを $RH_{re}$ とし、図中に示している。有効部材厚が大きいくほど収縮の時間変動量が小さくなり、収縮ひずみの最大値が平均値に漸近していくことがわかる。

有効部材厚と同定した $RH_{re}$ との関係を図6.6に示す。有効部材厚が100mmの場合については、平均湿度よりも小さな値を入力値とすることで最大値と一致したが、一般的なコンクリート構造物スケールにおいては収縮ひずみの最大値を予測する場合であっても平均湿度よりも高い値とする必要があることが明らかとなった。収縮ひび割れの発生予測の際には、有効部材厚に応じて湿度の入力値を決定するのがよい。

乾燥収縮予測式で算出されるのは部材の平均収縮ひずみであるため、表面という局所的に発生するひび割れの予測に適用できるのかについてはさらなる検討が必要である。

第6章 乾燥収縮予測式を用いて屋外環境下のコンクリート部材の乾燥収縮挙動を予測する手法の提案

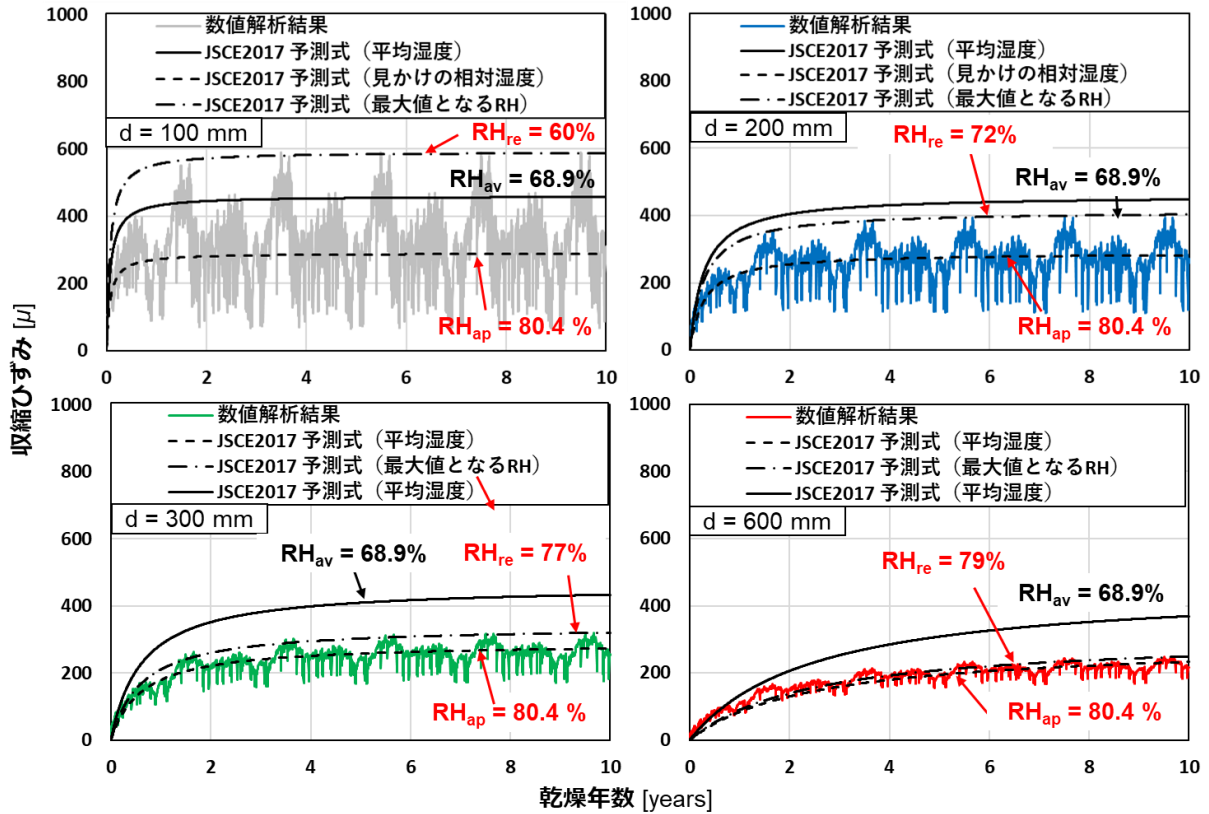


図 6.5 湿度変動と降雨を考慮した結果と一致する一定湿度の同定

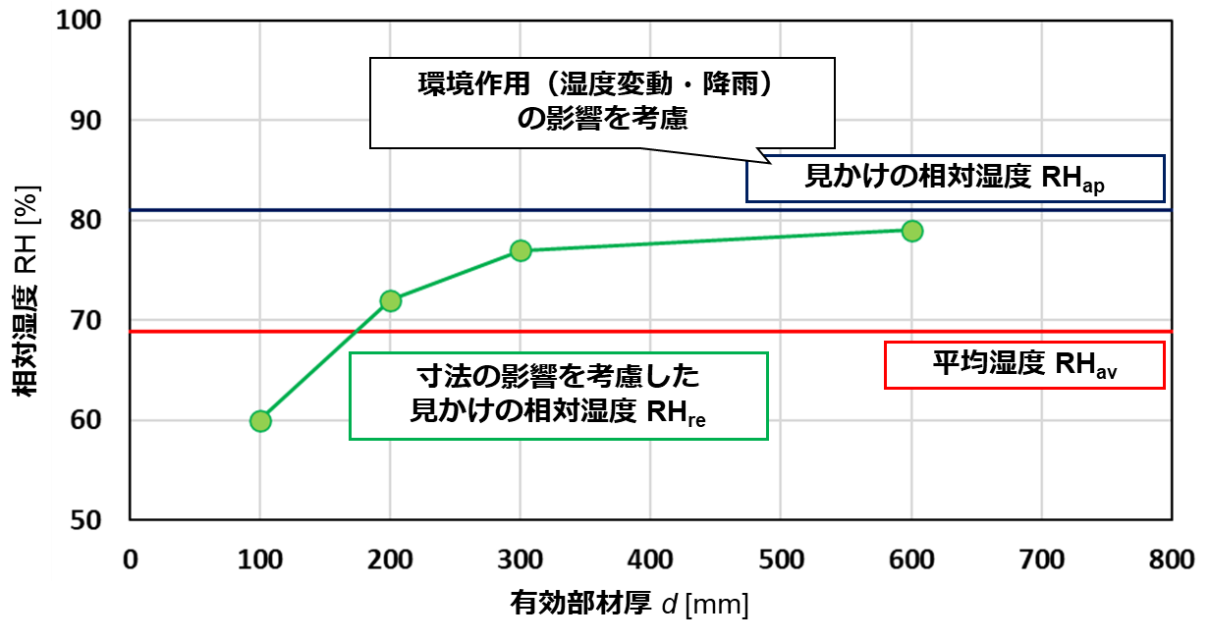


図 6.6 有効部材厚と  $RH_{re}$  の関係

## 6.5 第6章のまとめ

第6章では、現行の土木学会の乾燥収縮予測式において、屋外の環境作用の影響を見かけの相対湿度によって考慮し、屋外のコンクリート部材の収縮を予測する手法について提案し、その適用性を検証した。第6章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 乾燥収縮予測式を用いて屋外の収縮を予測する手法について検討した。湿度変動の影響を表す係数を平均湿度より算出し、降雨の影響を表す係数を降雨時間の割合より算出した。これらの2つの係数を平均湿度に乗じることで算出した見かけの相対湿度を予測式に適用することで、屋外におけるコンクリートの乾燥収縮の予測精度が向上することを示した。
- (2) 乾燥収縮予測式を用いた収縮ひび割れの予測について検討した。有効部材厚に応じて収縮の時間変動量が異なり、有効部材厚が大きいほど、収縮ひずみの最大値を算出する湿度は見かけの相対湿度に漸近することを示した。



## 第6章の参考文献

- [6.1] 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，土木学会，pp.106-110，  
2018

## 第7章 結論

本研究の目的は、屋外環境下におけるコンクリートの長期乾燥収縮挙動の予測精度を高めることであった。特に、従来の乾燥収縮予測式で示されていた見かけの相対湿度について、物理的意味を明らかにし、有効性を検証し、具体的な値の定め方について示すことが重要な検討課題であった。本研究では、屋外の環境作用がコンクリートの長期乾燥収縮挙動に及ぼす影響を実験および数値解析の双方の観点から検討し、屋外の環境作用を乾燥収縮予測式において考慮するための手法の提案およびその妥当性を検証した。

第2章では、屋外の環境作用がコンクリートの収縮挙動に及ぼす影響と気候特性の違いの影響について実験的に検討した。屋外環境下のコンクリートは、暴露地点の気候特性によって収縮挙動に地域差が生じることを明らかにした。乾燥収縮が進行する時期は気候特性の違いが影響し、長岡では夏期に、沖縄では冬期に降雨が少ないため収縮が進行しやすいことを実験によって明らかにした。横須賀、岡山では降雨の少ない冬期と梅雨明け後の夏期の2つの時期で収縮が進行することを明らかにした。暴露開始2年目においても1年目と同様の挙動が確認され、以降の収縮の進行についても同様の傾向になることを明らかにした。

第3章では、気温および湿度、日射、降雨を考慮できる、細孔構造に基づくコンクリート中の水分移動・乾燥収縮モデルを用いて実験結果の再現を試みた。いずれの暴露地点の結果においても、乾湿挙動および収縮ひずみの変化について解析値と実験値が一致することを示した。本研究で用いた水分移動解析および応力解析法が、温度、湿度、日射、降雨の影響を考慮しつつ、屋外におけるコンクリートの乾湿および収縮挙動を再現できる精度を有していることを確認した。

第4章では、寸法が異なる場合においても本研究の解析手法が適用可能であるかどうかを確認することを目的とし、暴露実験の結果と数値解析による再現解析結果の比較によって検討した。寸法が異なる場合においても数値解析が良好な結果を算出することを明らかにした。また、寸法および形状が収縮挙動に与える影響について、暴露実験および数値シミュレーションによって検討した。寸法の違いは収縮の時間変動量に影響し、寸法が大きいほど変動量が小さくなることを明らかにした。暴露環境が同一であれば、寸法によらず収縮の進行が収束した時点での平均収縮ひずみは同一になることを明らかにした。部材の形状により、受ける環境作用が異なる面が存在する場合には、同一の暴露環境条件であっても平均収縮ひずみは一致しないことを明らかにした。有効部材厚が同一であれば、寸法や形状の異なる部材であっても収縮の経時変化は同様の挙動となることを明らかにした。隅角部の多い部材や扁平な部材については収縮の進行が早くなる可能性があることを明らかにした。

第5章では、精度が確認された数値解析手法を用いて、屋外のコンクリート部材の収縮挙動に及ぼす日射および降雨それぞれ単独の影響について、数値解析の結果から検討した。日射による乾燥の促進が収縮挙動に及ぼす影響は小さくなく、降雨による吸水によって収縮挙動が大きく異なる地点があることを明らかにした。日射や降雨を考慮しなくても、湿度の時間変動を実測に基づいて与えることで、屋外のコンクリートの収縮挙動が概ね再現

できることを明らかにした。どの環境作用が収縮挙動に強く影響しているのかを把握し、収縮予測において考慮すべき環境作用であるかについて検討した。コンクリートの水分平衡特性は非線形性であるため、湿度変動がある場合では平均湿度を与えても収縮ひずみの平均値を算定できないことを明らかにし、一定湿度を与えて精度の高い解析結果の平均値と等価な解析結果を算出するには、年平均湿度よりも高い湿度を与える必要があることを明らかにした。屋外における湿度の時間変動を考慮するために湿度を見かけ上大きくする係数を算出する手法を提案し、ある程度の適用性がある可能性を示した。

第6章では、現行の土木学会の乾燥収縮予測式において、屋外の環境作用の影響を見かけの相対湿度によって考慮し、屋外のコンクリート部材の収縮を予測する手法について提案し、その適用性を検証した。湿度変動の影響を表す係数を平均湿度より算出し、降雨の影響を表す係数を降雨時間の割合より算出した。これらの2つの係数を平均湿度に乗じることで算出した見かけの相対湿度を予測式に適用することで、屋外におけるコンクリートの乾燥収縮の予測精度が向上することを示した。乾燥収縮予測式を用いた収縮ひび割れの予測について検討した。有効部材厚に応じて収縮の時間変動量が異なり、有効部材厚が大きいほど、収縮ひずみの最大値を算出する湿度は見かけの相対湿度に漸近することを示した。

## 謝辞

本論文を審査していただきました，長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工学専攻の下村匠博士（主査），丸山久一博士（副査），高橋修博士（副査），宮下剛博士（副査），中村文則博士（副査），岡山大学大学院環境生命科学研究科環境科学専攻の綾野克紀博士（副査）に深く感謝申し上げます。

下村匠博士には，修士課程からの5年間に加え，現職の福井工業高等専門学校環境都市工学科に着任してから1年半の計6年半，懇切丁寧で熱意のこもったご指導を賜りました。研究を進めるうえでの学術的指導にとどまらず，文章や発表資料での表現方法や研究者に必要な素養など，多くの貴重なことを学ばせていただきました。至らぬ点の多い小生に，研究活動の楽しさ，大変さ，奥深さを知らしめてくださいました。心から厚く御礼申し上げますとともに，今後のより一層の進歩に向けて邁進することを誓う次第であります。

丸山久一博士，高橋修博士，宮下剛博士，中村文則博士，綾野克紀博士には，本論文をまとめるにあたり，貴重なご意見をいただきました。特に，中村文則博士には発表資料の添削のご指導や高専教員生活におけるアドバイス等，多くのご助言をいただきました。先生方に感謝いたしますとともに，今後一層成長した姿をお見せできるよう，日々精進して参ります。

研究を進めるにあたり，実験にご協力くださいました，川端雄一郎博士（港湾空港技術研究所），藤井隆史博士（岡山大学大学院環境生命科学研究科環境科学専攻），富山潤博士（琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース）の諸氏に，ここに改めて感謝の意を表します。特に，川端雄一郎博士には，実験における計測のみならず，数値解析手法や論文の執筆活動において絶大なるご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

長岡技術科学大学技術職員の山口貴幸氏には，実験に使用する材料の手配や試験体を静置する架台の製作など，実験を進めるにあたりご協力いただきました。感謝いたします。

大学院生活を共に過ごしたコンクリート研究室の先輩，同輩，後輩および秘書の水澤好美氏には，公私ともに大変お世話になりました。特に，博士後期課程を共にした大原涼平氏（長野工業高等専門学校），井向日向博士（岐阜工業高等専門学校）には，研究に行き詰った際によく相談させていただきました。心から感謝いたします。

現職の福井工業高等専門学校に着任して以降，環境都市工学科の教職員の皆様には，小生の学位取得を優先するにあたり，校務等に負担がかからないようにご配慮くださり，ご迷惑をおかけしました。今後精一杯恩返しをさせていただきたく存じます。

本論文は，多くの方のご支援を得て，小生のこれまでの研究成果をまとめたものでありますが，新しい疑問点や検討課題が続々と出ており，一息つけると思ったのも束の間でまた走り出さねばなりません。よりよい成果を創出し，社会に貢献できる研究者であると同時に，研究者を目指す高専学生を大学へと送り出す教育者となることを目指し，研究活動および教育活動に邁進していくことが，お世話になった皆様への恩返しであると考えております。

最後に，これまで小生の学生生活を支え，温かく見守ってくれた，亡き父をはじめとする家族の皆様感謝申し上げます。