

# 論文 乾燥によるモルタルのせん断強度変化がコンクリートの力学的性質変化に及ぼす影響

杉本 宙威\*1・丸山 一平\*2・SRIMOOK Puttipong\*1・前川 昂輝\*4

**要旨:** 本研究では、モルタル、骨材およびその界面の3相からなるコンクリートのメソスケールモデルを対象に、3次元RBSMを用いた数値解析により、モルタルの乾燥によるせん断強度変化が乾燥後のコンクリートの物性変化に与える影響について検討した。その結果、解析モデルは乾燥収縮量が小さい粗骨材を用いたコンクリートの実験結果を良く再現した。セメントの変質に基づいて同じ割合でモルタルのせん断バネおよび垂直バネのMPC比を決めることで、コンクリートの圧縮強度変化を評価できることを示した。

**キーワード:** 乾燥, ひび割れ, 圧縮強度, ヤング係数, 乾燥収縮, RBSM

## 1. はじめに

金属製錬プラント, キルン, 原子力発電所などの産業プラントでは、コンクリート構造物が100°C以下の高温および乾燥に長期間さらされることがある。また、100°C以下の温度における乾燥はセメント<sup>1)</sup>, モルタル<sup>2)</sup>, コンクリート<sup>3)</sup>の力学的性質を変化させ、ひいては鉄筋コンクリート部材<sup>4)</sup>の性能に影響を及ぼす。そのため、コンクリート構造物の長期利用に向けた経年劣化管理が求められ、現在および将来の健全性の両方を評価することが重要である。特に将来の健全性評価においては、長期間の乾燥によるコンクリートの力学的性質変化(Mechanical property change, MPC)への理解が必要である。

長期間(試験体の含水率が相対湿度と平衡に達するまでの期間を表す)の乾燥によるコンクリートの物性変化のメカニズムに関する研究は少ない。既往研究<sup>3)</sup>では、粗骨材の鉱物組成と収縮量が異なる5種類の完全水和コンクリートを長期間乾燥した後、圧縮荷重試験を実施した。その結果、乾燥および加熱条件におけるコンクリートの圧縮強度とヤング係数の変化は、硬化セメントペースト(Hardened cement paste, HCP)の強度変化と、モルタルおよび骨材の体積変化の差による骨材周辺のひび割れで説明できると報告されている。また同研究結果を対象として、篠野ら<sup>5)</sup>は乾燥によるコンクリートのMPCとひび割れを考慮した3次元の剛体バネモデル(Rigid-body-spring model, RBSM)による数値解析手法を構築し、長期間の乾燥によるコンクリートの物性変化メカニズムの解明を試みた。同研究では、含水率変化に伴うモルタルのMPC比と骨材およびモルタルの収縮を考慮することで、コンクリートの圧縮強度変化が実験結果<sup>3)</sup>を定性的・定量的に再現できるとし、解析モデルの妥当性を示した。その際に、モルタルの強度変化については、引張強度と

破壊エネルギーに対してのみ、乾燥によるHCPの曲げ強度変化率<sup>3)</sup>に基づいたMPC比を考慮している。これはモルタルの強度変化が、主にケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)の微細構造変化によるHCPの変質に依存<sup>3)</sup>するという仮説に基づいている。しかし既往の研究<sup>5)</sup>では、ペーストの変質についてRBSMモルタル要素における垂直バネとせん断バネに及ぼす影響割合は実験結果に合うように恣意的に影響割合を変化させていた。モルタルの物性と骨材の物性からコンクリートの性能を予測する上ではこのモデルで問題がないが、本来はセメントペーストの変質とモルタルの物性変化について定量的な関係があるべきと推察される。そこで、本検討では、コンクリート構造物の長期利用に向けた健全性評価に寄与することを目的として、既往研究<sup>3)</sup>を対象とした解析手法<sup>5)</sup>に基づき、ペーストの強度変化メカニズムに立ち戻り、RBSM上のモルタルの物性を表現するバネへの影響の及ぼし方について改めて評価を行った。

## 2. RBSM

図-1にRBSMの概念図を示す。RBSMは、解析対象を剛体要素と要素間のバネにより離散化する手法である<sup>6)</sup>。バネに非線形構成則を導入することで、連続体モデル

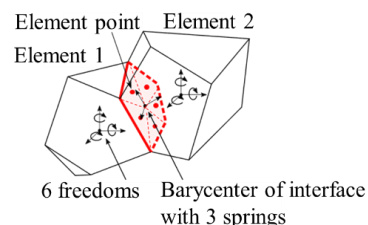


図-1 RBSMの概念図<sup>6)</sup>

\*1 国立大学法人 名古屋大学 大学院環境学研究科 (学生会員)

\*2 国立大学法人 名古屋大学 大学院環境学研究科教授 博士(工学) (正会員)

\*3 国立大学法人 東京大学 大学院工学系研究科教授 博士(工学) (正会員)

\*4 国立大学法人 名古屋大学 大学院環境学研究科 (正会員)

より比較的容易に解析対象物の破壊挙動をモデル化することができる<sup>7)</sup>。各界面は、垂直方向に1つ、直交する接線方向に対して2つのバネを持ついくつかの三角形に分割した。本研究では、ひび割れの要素分割依存性を低減するための要素分割として一般的なボロノイ分割<sup>8)</sup>を採用した。

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析モデル

本研究では、既往研究<sup>3)</sup>において乾燥収縮率が小さい熱変成凝灰岩(Agg-G3)を用いたコンクリート(G3)を対象として乾燥解析および圧縮載荷解析を実施した。

図-2 に解析に用いたコンクリートの試験体概要を示す。対象とする乾燥実験で用いられたコンクリート(G3)<sup>3)</sup>の試験体寸法はΦ50×100 mm であり、粗骨材は最大寸法 20mm, 粗粒率 6.68 であった。そこでコンクリート(G3)<sup>3)</sup>の試験体寸法に従い、解析モデルとしてΦ50×100 mm の円柱試験体<sup>5)</sup>を用いた。要素は粗骨材、モルタル、および粗骨材-モルタルの遷移帯(Interfacial transition zone, ITZ)の3相とし、平均要素サイズは2.1mm程度であった。また、粗骨材は最大寸法 20mm, 体積率約 37.4%, 粗粒率 6.83 とした。

#### 3.2 材料特性値とバネパラメータ

本研究では篠野ら<sup>5)</sup>による解析手法に従い、乾燥によるモルタルのせん断強度変化考慮したコンクリートの MPC を提案する。表-1 に本研究で用いた材料特性値を示す。材料特性値は既往研究で設定された値<sup>5)</sup>に従う。

モルタルおよび粗骨材のバネには図-3 (a), 図-3 (b)に示すように、コンクリート用に開発された構成則<sup>7)</sup>が導入されている。垂直バネの引張構成則は 1/4 軟化モデルとした。せん断バネの構成則では、ピーク後の除荷はせん断剛性に従い、再載荷時は過去最大の応力ひずみ点を目指すように挙動する。また、せん断バネのパラメータの構成則を図-4 に示す。せん断軟化係数 $\beta^*$ とせん断強度 $\tau^*$ は図-4 より垂直バネの応力の関数であり、図-3(b)のせん断軟化勾配 $K^*$ はせん断剛性 $G^*$ と図-4(a)のせん断軟化係数 $\beta^*$ の積で求められる。

RBSM は構成則を導入したバネと、バネで連結された複数の剛体要素の相互作用で巨視的な材料応答を表現する<sup>8)</sup>。そのため実験から得られる材料特性値に対して、既往研究<sup>7)</sup>を参考に表-2, 表-3 に示すバネパラメータを乗じることでバネの構成モデルを算出した。ITZ はモルタルよりも強度およびヤング係数が小さく<sup>9)</sup>、コンクリートのひび割れ挙動を評価する上で重要な特性である。そこで本研究では、図-3 (c)に示す ITZ の構成則<sup>5)</sup>を導入し、表-2, 表-3 に示すバネパラメータ<sup>5)</sup>を設定した。

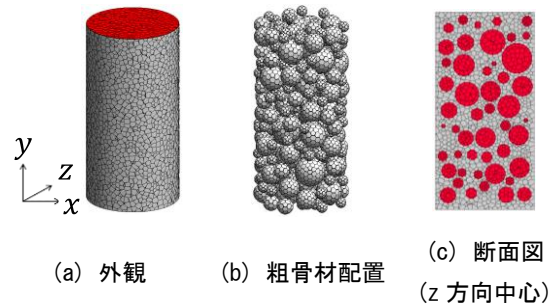


図-2 試験体概要(赤色が粗骨材要素)

表-1 材料特性値<sup>5)</sup>

	モルタル	粗骨材
ヤング係数 : $E$ ( $N/mm^2$ )	16,900	70,000
引張強度 : $f_t$ ( $N/mm^2$ )	3.79	10.0
圧縮強度 : $f_c$ ( $N/mm^2$ )	46.6	150.0
破壊エネルギー : $G_{ft}$ ( $N/m$ )	0.0615	0.02

### 4. 乾燥シミュレーション

#### 4.1 解析手順

本研究では、セメントペーストの曲げ強度変化に基づく MPC 比によってモルタルのせん断強度変化を考慮した際に、乾燥および高温条件における実験結果<sup>3)</sup>を再現可能であるかについて検討する。そのため、既往研究<sup>3)</sup>を参考に乾燥条件として Sealed, 80%RH, 60%RH, 40%RH, 20%RH, さらに高温条件として 70°C の条件で解析を行い、実験結果<sup>3)</sup>と比較する。また、実験<sup>3)</sup>では Sealed~20%RH の乾燥は 20±1°C の恒温室で実施され、40°C~90°C の高温乾燥は湿度制御がされていない室内空気(20~25°C, 30~70%RH)に解放されていた温度制御チャンバーにて実施された。そのため解析では図-5 に示す通り、各乾燥条件における封緘時のモルタルの含水率<sup>3)</sup>を基準とした相対含水率を試験体外部の相対湿度と仮定して、水分移動をシミュレートした。乾燥解析では、含水率および乾燥収縮量が平衡状態になるまで約 150 日間の水分移動をシミュレートし、その後圧縮載荷解析を行った。また、70°C の乾燥条件では水分移動解析に並行して熱移動解析を行った。熱移動解析では、乾燥開始後に 20°C から 70°C までの加熱を 1 時間、また 70°C で 150 日間乾燥後に 70°C から 20°C までの冷却を 1 時間実施し、さらに温度分布が 20°C で均一になるまで 9.6 時間評価した。乾燥後の圧縮載荷解析では、図-2 (a)に示すように、厚さを持たない上面のプレート要素に対して、-

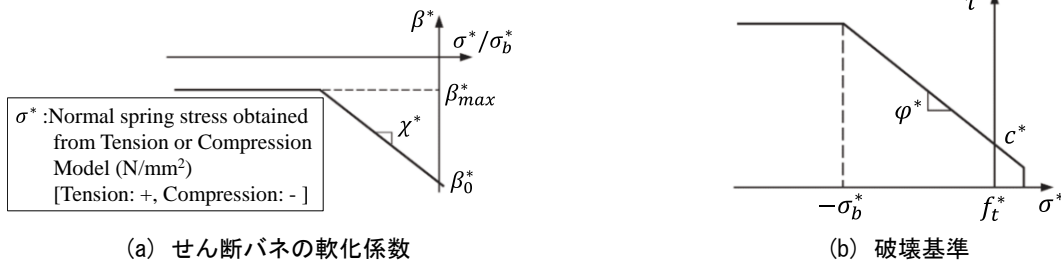
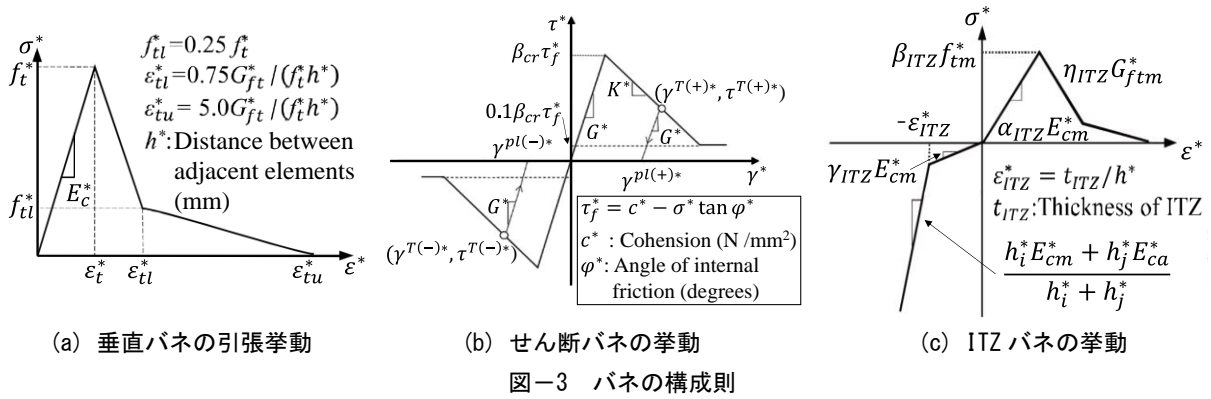


表-2 垂直バネパラメータ(添え字の m, a はモルタル, 骨材を示す)

	ヤング係数: $E^*$ ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度: $f_t^*$ ( $\text{N/mm}^2$ )	圧縮強度: $f_c^*$ ( $\text{N/mm}^2$ )	破壊エネルギー: $G_{ft}^*$ ( $\text{N/mm}^2$ )
モルタル	$1.4 E_m$	$0.8 f_{tm}$	$1.5 f_{cm}$	$0.5 G_{ftm}$
粗骨材	$1.4 E_a$	$0.8 f_{ta}$	$1.5 f_{ca}$	$0.5 G_{fta}$
ITZ	$0.5 E_{cm}^*$	$0.8 f_{tm}^*$	—	$0.5 G_{ftm}^*$

表-3 せん断バネパラメータ(添え字の m, a はそれぞれモルタル, 骨材を示す)

	$\eta = G^*/E^*$ (-) ( $G^*$ : せん断剛性)	粘着力: $c^*$ ( $\text{N/mm}^2$ )	内部摩擦角: $\varphi^*$ (degree)
モルタル	0.35	$0.14 f_{tm}$	37
粗骨材		$0.14 f_{ta}$	
ITZ		$0.8 c_m^*$	

0.002mm/step(圧縮方向)の強制変位を入力した。いずれの解析ステップも収束計算を行い、外力に対する残差の割合が  $10^{-6}$  以下になるか、150 回計算を行った後に次のステップへ不釣り合い力を繰り越して計算を進めた。

本解析における境界条件は以下の通りである。乾燥時の境界条件は、試験体の上面とプレート要素間のせん断剛性をモルタルのヤング係数の 1/1000 倍に設定することで、拘束の影響を排除した。また、X, Y, Z 軸回りの回転は固定し、上面鉛直方向ならびに側面は自由変形とした。圧縮載荷時の境界条件は、試験体の底面を完全固定としている。

#### 4.2 水分・熱移動解析

本研究では、トラスネットワークモデルによる水分・

熱移動解析で得られる各面の含水率および温度から、乾燥収縮ひずみおよび熱ひずみを算出し、等価節点力として各バネに入力した。表-4、表-5 に、既往研究<sup>5)</sup>で用いた水分・熱移動解析における各材料の諸係数を示す。なお、本研究におけるモルタルの熱膨張係数は、既往研究(G3)<sup>3)</sup>におけるコンクリート・粗骨材の熱膨張係数の実験結果と、調査から算出されるコンクリート、粗骨材、細骨材、ペーストの体積割合から、モルタル体積を考慮して式(1)により算出した。

$$TEC_c = \frac{1}{\frac{V_m}{TEC_m} + \frac{V_a}{TEC_a}} \quad (1)$$

ここで、 $TEC$ ：熱膨張係数， $V$ ：体積率(添え字の  $c, m, a$  はコンクリート，モルタル，骨材を表す)である。

含水率変化に伴う収縮ひずみは，既往研究<sup>3)</sup>において実験結果<sup>3)</sup>から定められた式(2)～式(4)を用いて算出した。式(4)におけるモルタルの含水率と相対湿度の関係は既往研究<sup>3)</sup>を参照した。

$$\varepsilon_{sh, mor} = 5162 \cdot \Delta R^4 - 8726 \cdot \Delta R^3 + 4527 \cdot \Delta R^2 - 2733 \cdot \Delta R \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sh, Agg-G3} = -60 \cdot \Delta R \quad (3)$$

$$\Delta R = 1 - w/w_0 \quad (4)$$

ここで， $\varepsilon_{sh, mor}$ ：コンクリート解析におけるモルタルの入力収縮ひずみ， $\varepsilon_{sh, Agg-G3}$ ：低収縮骨材(Agg-G3)の入力収縮ひずみ， $\Delta R$ ：モルタルの相対含水率の減少量， $w$ ， $w_0$ ：乾燥条件および封緘条件におけるモルタルの含水率(g/g)である。

#### 4.3 モルタルの物性変化

モルタルの実験結果<sup>3)</sup>を比較対象として，含水率変化に伴うモルタルの MPC 比のキャリブレーションを行った。キャリブレーションでは， $\Phi 50 \times 100$  mm のモルタル要素のみで構成された円柱試験体を使用し，平均要素サ

表-4 各材料の水分移動係数

	水分拡散係数 (mm <sup>2</sup> /day)	水分伝達率 (mm/day)
モルタル	300.3	15.78
粗骨材		

表-5 各材料の熱移動係数

	熱伝導率 (W/(m·K))	熱伝達率 (W/(m <sup>2</sup> ·K))	熱膨張係数 (/°C)
モルタル	1.5	12.0	$9.5 \times 10^{-6}$
粗骨材	2.5	12.0	$8.5 \times 10^{-6}$

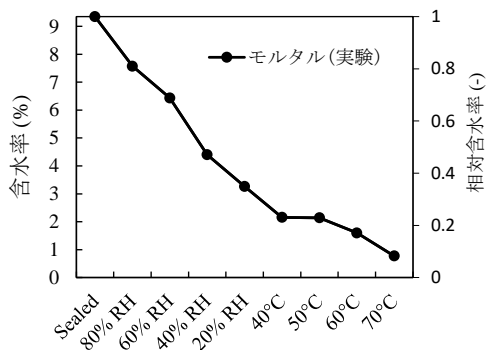


図-5 モルタルの乾燥条件と相対含水率の関係<sup>3)</sup>

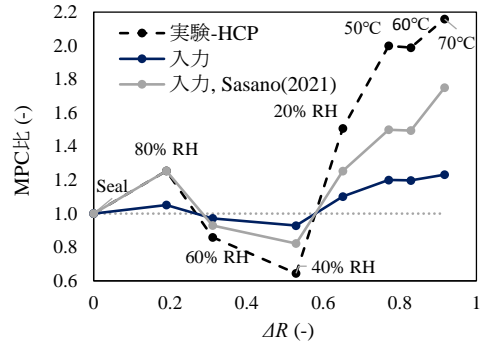


図-6  $f_{tm}^*$ ,  $G_{ftm}^*$ ,  $c_m^*$  の MPC 比

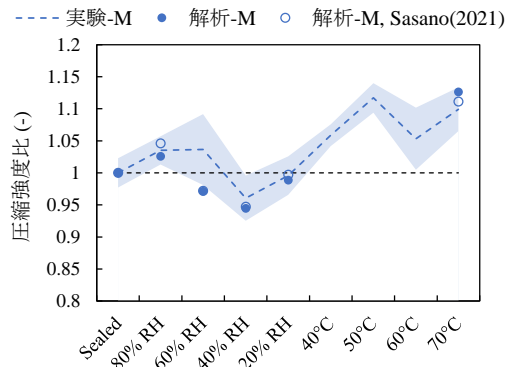


図-7 モルタルの圧縮強度比

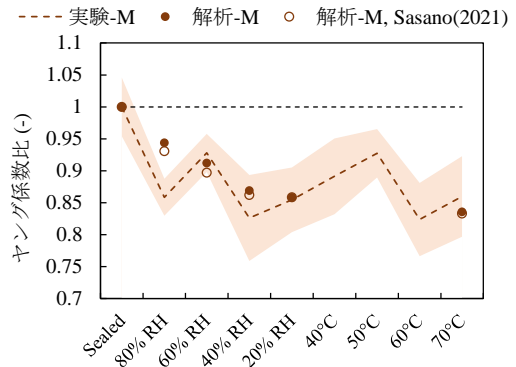


図-8 モルタルのヤング係数比

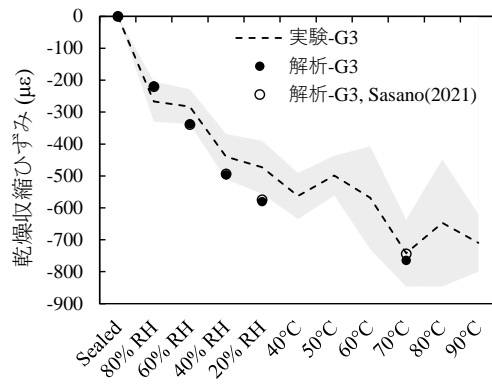


図-9 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

イズは約 2.9 mm であった。図-6 に入力用 MPC 比のキャリブレーション結果を示す。図中の実験-HCP は、丸山ら<sup>3)</sup>による HCP 曲げ強度比の実験結果の平均値，“入力”および“入力, Sasano(2021)”はそれぞれ本研究および篠野ら<sup>5)</sup>の解析モデルにおけるモルタルの MPC 比を示している。篠野ら<sup>5)</sup>は垂直バネのヤング係数 $E_{cm}^*$ 、引張強度 $f_{tm}^*$ 、破壊エネルギー $G_{ftm}^*$ に対してモルタルの実験値が再現されるように MPC の変化率 (MPC 比) を導入することにより、乾燥によるモルタルの引張強度およびヤング係数の変化を再現した。このとき、せん断バネの変化は考慮していない。本研究ではこれらに加えて、乾燥によるモルタルのせん断強度 $\tau_{fm}^*$ の変化を考慮するため、 $\tau_{fm}^*$ の引数である粘着力 $c_m^*$ に対して MPC 比を導入した。その際、モルタルの引張強度 $f_{tm}^*$ 、破壊エネルギー $G_{ftm}^*$ 、および粘着力 $c_m^*$ が HCP の曲げ強度比(実験-HCP)<sup>3)</sup>に対して 0.2 倍の比率で一定で変化すると仮定した。これは、長期乾燥させたコンクリートおよびモルタルの圧縮強度の変化が、HCP の曲げ強度の変化と類似しているという実験結果<sup>3)</sup>と、セメントペーストの物性変化は垂直バネだけでなくせん断バネにも同様に生じているはずであるとの考察に基づいている。なお、 $E_{cm}^*$ に対する MPC 比は、既往研究<sup>5)</sup>においてモルタルの実験結果<sup>3)</sup>から近似された式(5)を用いて算出した。

$$\begin{aligned} E_{cm}^*/E_{cm0}^* = & -0.615 \cdot \Delta R^4 + 0.0484 \cdot \Delta R^3 \\ & + 0.3826 \cdot \Delta R^2 - 0.4487 \cdot \Delta R + 1.0 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $E_{cm}^*$ 、 $E_{cm0}^*$ :任意の乾燥条件および封緘条件におけるモルタルのヤング係数である。

図-7、図-8 に各乾燥条件におけるモルタルの圧縮強度比およびヤング係数比の実験結果と解析結果を示す。図中および本文中の実験-M は丸山ら<sup>3)</sup>によるモルタル圧縮強度試験の結果の平均値、解析-M および解析-M, Sasano(2021)はそれぞれ本研究および篠野ら<sup>5)</sup>の解析モデルにおけるモルタルの解析結果を示している。また、塗りつぶされた範囲は実験結果<sup>3)</sup>の標準偏差( $\pm 1\sigma$ )を示している。図-7、図-8 より、モルタルの圧縮強度比及びヤング係数比が概ね $\pm 1\sigma$ 以内であり、実験-M と同様の挙動を確認できたため、図-6 の MPC 比(入力)を用いることとした。なお、本研究では ITZ のバネパラメータに対してもモルタルと同じ MPC 比を入力した。

## 5. 解析結果

以降、図中および本文中の実験-G3 は丸山ら<sup>3)</sup>によるコンクリート(G3)の圧縮強度試験の結果の平均値、解析-G3 および解析-G3, Sasano(2021)はそれぞれ本研究および

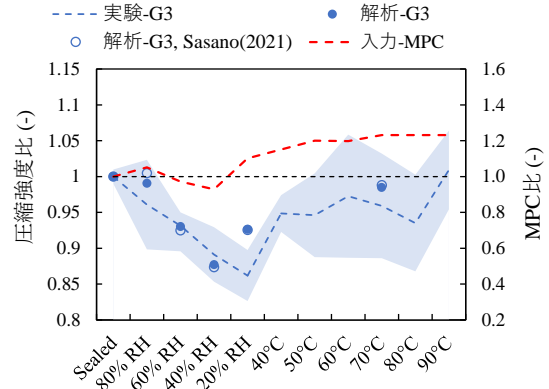


図-10 コンクリートの圧縮強度比

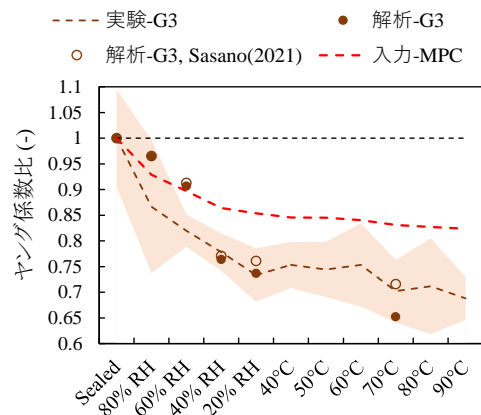


図-11 コンクリートのヤング係数比

び篠野ら<sup>5)</sup>の解析モデルにおけるコンクリート(G3)の解析結果を示している。

図-9 に各乾燥条件におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみの解析結果と実験結果を示す。解析-G3 は $\pm 1\sigma$ 以内であり実験-G3 と同様の傾向を示すことから、本研究における平衡状態のコンクリート乾燥収縮ひずみの解析結果は合理的な値を与えることが分かる。

図-10、図-11 に各乾燥条件におけるコンクリートの圧縮強度比とヤング係数比の解析結果と実験結果について、本研究における MPC 比(入力-MPC)を併せて示している。解析-G3 は、圧縮強度比では 20%RH、ヤング係数比では 80%RH および 60%RH の乾燥条件において実験値<sup>3)</sup>の傾向と多少異なるが、1) 乾燥が進むほどヤング係数比が小さくなる点、2) 加熱によって強度が増加する点、において実験結果<sup>3)</sup>と同様の傾向を示している。また、解析値のほとんどが実験値<sup>3)</sup>の標準偏差以内であった。図-10 に示すように解析-G3 の圧縮強度比は入力した入力-MPC と同様の挙動を示している。

図-10、図-11 より解析-G3 の図中に示す変化率 1.0(黒点線)に対する差は、70°Cのヤング係数比を除いた乾燥条件で解析-G3, Sasano(2021)と同等の結果が得られ

た。乾燥過程におけるモルタルのせん断強度変化を考慮することでも実験<sup>3)</sup>を再現することが分かった。このことは、ペーストの変質がモルタルの変質に直接的に影響を及ぼしており、その影響割合は一定の値となっており、従来モデルよりもより汎用性の高いモデルとなったと考えられる。

## 6. 考察

ここで、前節で示された本研究における MPC 比がコンクリートの物性変化に与える影響について、モルタルのせん断強度変化の影響を踏まえて既往研究と比較しながら考察を行う。

図-3 と図-4 に示したバネの構成則より、せん断強度後のせん断バネの物性(せん断強度 $\tau_f^*$ 、せん断軟化勾配 $K_m^*$ )は垂直バネの応力の関数<sup>7)</sup>である。このことから、既往研究<sup>5)</sup>のように垂直バネの物性のみを変化させた場合のコンクリートの力学的性質変化の挙動は、間接的に乾燥によるせん断強度 $\tau_{fm}^*$ およびせん断強度以後のせん断軟化勾配 $K_m^*$ の変化を受けた結果であるといえる。この垂直バネの物性変化による間接的なせん断バネの物性変化と、コンクリートの力学的性質変化に及ぼす影響については、モルタルの垂直バネおよびせん断バネの物性を直接変化させた本研究と、垂直バネのみ物性を直接変化させた篠野ら<sup>5)</sup>のモルタルおよびコンクリートの圧縮強度比とヤング係数比が同様の傾向を示したことから確認できる。また、本研究と篠野ら<sup>5)</sup>の解析結果がほとんど同様の挙動を示した要因として、垂直バネの物性変化による間接的なせん断バネの物性変化、およびせん断バネの直接的な物性変化が乾燥後のモルタルとコンクリートの物性変化に及ぼす影響が釣合ったことが考えられる。

## 7. 結論

本研究は既往研究<sup>3), 5)</sup>を参考に、ペーストの強度変化メカニズムに立ち戻ってモルタルのせん断強度の変化を考慮したコンクリートの MPC を評価する解析モデルを検討し、解析モデルにおけるモルタルの物性を表現するバネへの影響の及ぼし方について改めて評価を行った。

本研究で得られた知見を以下に記す。

- 1) モルタルのせん断強度変化の影響を考慮して、粗骨材の乾燥収縮量が小さいコンクリートを対象に、乾燥による MPC を評価する解析モデルを構築し、解析結果は実験結果<sup>3)</sup>とよく一致していた。
- 2) モルタルのせん断バネおよび垂直バネの両方を物性変化させた場合、ペーストの変質に基づいて一定の割合で MPC 比を決めることで、コンクリートの圧縮強度変化を評価できることを示した。
- 3) 乾燥によるモルタルの垂直バネおよびせん断バ

ネの物性変化を直接考慮した点と、乾燥によるセメントペーストの強度変化をモルタルに一定の割合で引継いでコンクリートの圧縮強度変化を再現した点において、本解析モデルは汎用性が高く有用である。

今後、既往研究<sup>3)</sup>において骨材の乾燥収縮量が大きく、乾燥後の損傷が小さかったコンクリート(G2)を対象に本解析モデルの MPC 比を導入して妥当性確認を行うとともに、セメントペーストの変質に関する実験結果によってコンクリートの物性予測を可能とする解析モデルの構築も試みる。

## 謝辞

本研究は、資源エネルギー庁・受託研究・令和4年度原子力の安全性向上に資する技術開発事業の支援を受けた。

## 参考文献

- 1) Maruyama, I. et al : Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying process, *Cem. Concr. Res.* 58, pp.20–34, 2014
- 2) Pihlajavaara S.E. : A review of some of the main results of a research on the ageing phenomena of concrete: effect of moisture condition on strength, shrinkage and creep of mature concrete, *Cem. Concr. Res.* 4, pp.761–771, 1974
- 3) Maruyama, I. et al : Strength and Young's modulus change in concrete due to long-term drying and heating up to 90 °C, *Cem. Concr. Res.* 66, 48–63, 2014
- 4) Sasano, H. et al : Impact of drying on structural performance of reinforced concrete shear walls, *J. Adv. Concr. Technol.* 16, pp.210–232, 2018
- 5) Sasano, H. et al : Mechanism of drying-induced change in the physical properties of concrete: A mesoscale 解析ulation study, *Cem. Concr. Res.* 143, 2021
- 6) Kawai, T. : New discrete models and their application to seismic response analysis of structures, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.48, pp.207–229, 1978
- 7) Yamamoto, Y. et al. : Analysis of compression failure of concrete by three-dimensional rigid body spring model. *J. Japan Society of Civil Engineers*, Vol.64, No.64, pp.612–630, 2008
- 8) Bolander, J. E. Sato, S. : Fracture analyses using spring networks with random geometry, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.61, pp.569–591, 1998
- 9) Ollivier, J. P. Bourdette, B. : Interfacial transition zone in concrete, *Advanced Cement Based Material*, Vol.2, No.1, 1995