

# 凍結融解環境下におけるポーラスコンクリートの温度解析に用いる熱特性値モデルの検討

## The study of Thermal Characteristics Model used for the Thermal Analysis of Permeable Concrete under Freeze-thaw Environment

○菊池 史織ラニヤ\*, 兵頭 正浩\*\*, 緒方 英彦\*\*, 吉岡 有美\*\*

KIKUCHI shioriraniya\*, HYODO Masahiro\*\*, OGATA Hidehiko \*\* and YOSHIOKA Yumi \*\*

### 1. はじめに

多孔質体であるポーラスコンクリートは、寒冷地において用いる場合、空隙中に存在する水が凍結する際の膨張圧の繰返し作用（凍結融解作用）による早期機能低下が問題となっている。この問題を解決するためには、凍結融解作用の要因となる飽和状態の温度変化を明らかにする必要がある。そこで、著者らは、飽和したポーラスコンクリートの凍結融解過程における熱特性値を実験的・解析的に評価し、凍結融解環境下における温度解析手法を構築するための研究を実施している<sup>1)</sup>。

飽和状態のポーラスコンクリートにおける温度変化の特徴として、凍結融解環境下の場合、顕熱変化と潜熱変化の区間が明瞭に現れることが分かっている<sup>1)</sup>。顕熱変化の区間は、連続空隙部と独立空隙部が水で満たされた状態（常温飽和状態）と氷で満たされた状態（低温飽和状態）である。本研究では、便宜的に水の氷点・氷の融点である0°C以下を低温、0°Cより高いときを常温としている。一方、潜熱変化の区間は、融解及び凍結の過程において0°C一定で温度変化している状態である。ただし、現状では凍結融解環境下において飽和したポーラスコンクリートを対象に、潜熱を考慮した温度解析を精度よく行うことができない。

その原因として、潜熱を考慮した温度解析に用いる熱特性値のモデルがないことが挙げられる。また、低温飽和状態における温度解析では熱特性値の温度依存性を考慮しなければならぬことが、日本熱物性学会のデータより明らかとなっている<sup>2)</sup>。現在の解析では入力パラメータを供試体温度に関わらず一定値としているため、厳密な解析には至っていない。

本研究ではこの解決策として熱特性値の温度依存性を考慮した熱特性値モデルの構築を行うことで解析精度の向上を図ることとした。本報では、凍結融解環境下におけるポーラスコンクリートの温度解析に

**Table 1** ポーラスコンクリートの配合  
Mix proportion of permeable concrete

Target void (%)	W/C (%)	V <sub>m</sub> /V <sub>g</sub> (vol.%)	V <sub>s</sub> /V <sub>m</sub> (vol.%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	B		S	G
					C	P		
20	30.0	47.5	17.5	103	322	20	117	1,456

V<sub>m</sub>/V<sub>g</sub> : volume ratio of mortar and coarse aggregate

V<sub>s</sub>/V<sub>m</sub> : volume ratio of mortar and fine aggregate

用いる熱特性値モデルの検討を行った。

### 2. 検討対象の熱特性値と温度設定の概要

本研究で解析に使用する3次元温度応力解析プログラム ASTEA MACS の入力パラメータは、熱伝導率、密度、比熱、初期温度の4つである。初期温度は温度測定条件より定めることができるため、熱伝導率、密度、比熱の3つの熱特性値を検討対象としてモデルを作成し、温度によって変化させる副プログラムを作成した。

温度解析に使用した供試体は、目標空隙率20%のポーラスコンクリート（粗骨材が7号砕石）であり、寸法φ10×20cmの円柱供試体である。ポーラスコンクリートの配合をTable1に示す。供試体は、中心温度を測定するため、作製時にT型熱電対温度計を埋設した。常温飽和状態では、供試体中心温度を20°Cから60°Cまで上昇させる昇温過程と、60°Cから20°Cまで降下させる降温過程で温度測定を行った。低温飽和状態では、供試体中心温度を-35°Cから-5°Cまで上昇させる昇温過程と、-5°Cから-35°Cまで降下させる降温過程で温度測定を行った。

### 3. 熱特性値の基本形モデルの概要

作成した基本形モデルをFig.1に示す。このモデルは、日本熱物性学会<sup>2)</sup>の常温における水の熱特性値と低温における氷の熱特性値を参考に作成した。

常温側の熱伝導率と比熱は一定とし、低温側の熱伝導率は温度が低くなるにつれて線形的に上昇、比熱は温度が低くなるにつれて線形的に低下とした。

\*鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科, Graduate School of Sustainability Science, Tottori University, \*\*鳥取大学農学部, Faculty of Agriculture, Tottori University, 凍結融解、ポーラスコンクリート、熱特性値モデル

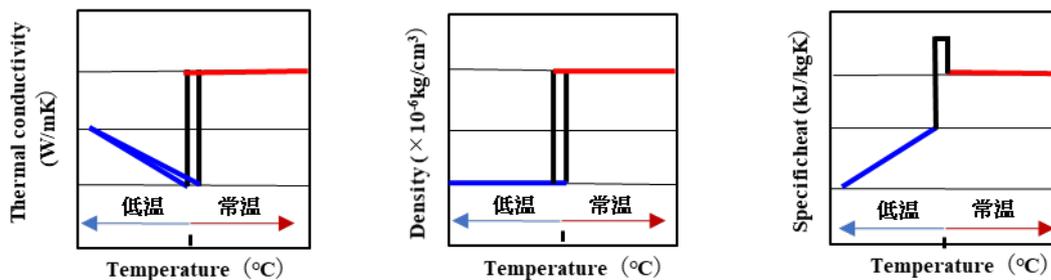


Fig.1 温度依存性を考慮した熱特性値の基本モデル  
Basic model of the thermal characteristics considering thermal dependence

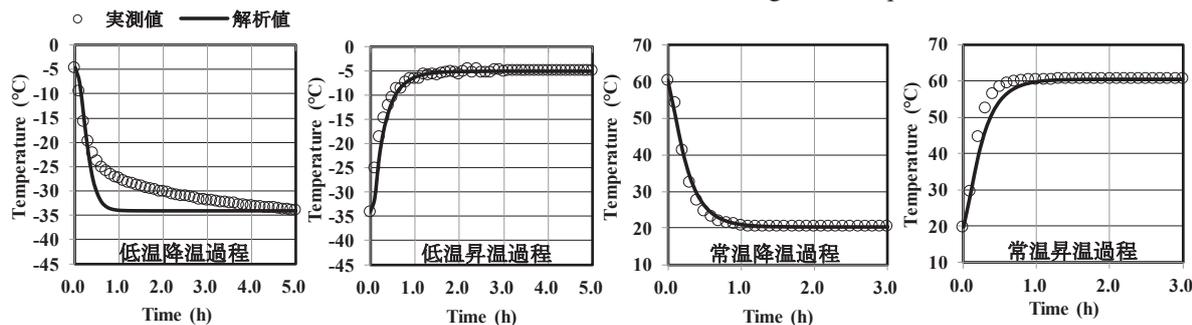


Fig.2 供試体中心温度の実測値と解析値の比較  
Comparison of measured and simulated temperature of specimen

密度は、常温側と低温側でそれぞれ一定とした。

#### 4. 副プログラムの作成

今回作成した副プログラムは、潜熱を考慮せず、基本形モデルをもとに、青線の低温領域と赤線の常温領域 (Fig.1 参照) をそれぞれ区別して熱特性値の設定を行った。

熱伝導率の低温領域においては  $0^{\circ}\text{C}$  で  $1.92\text{W/mK}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$  では  $2.07\text{W/mK}$  と設定し、その間は線形補間を行った。ここで  $0^{\circ}\text{C}$  の熱伝導率は、試行錯誤の結果から、常温の設定値の 46% としている。密度は、低温側と常温側の飽和時のポーラスコンクリートの測定密度を区分して用いている。常温飽和状態で  $2,183\text{kg/m}^3$ 、低温飽和状態で  $2,178\text{kg/m}^3$  とした。比熱は、 $-40^{\circ}\text{C}$  から  $10^{\circ}\text{C}$  ごとの温度区分におけるエンタルピを事前に計算しておき、それを副プログラムに組み込み、供試体温度から求めるようにしている。エンタルピは比熱と温度の積分値であり、もとなる比熱は試行錯誤の結果から決めた。

#### 5. 温度解析条件

温度解析は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のポーラスコンクリートの中心断面を切り取った 2 次元の有限要素解析で行った。7 号碎石の最大寸法が  $5\text{mm}$  であるため 1 メッシュ  $5\text{mm}$  間隔にした。節点数 861、要素数 800 である。計算は SKYLINE 法で行い、積分係数は 1 とした。また、時間積分の時間間隔は  $\Delta T = 0.1\text{h}$  と設定した。温度境界条件は側面を温度固定境界とし、上面

と底面を断熱境界に設定した。

#### 6. 解析結果

常温飽和状態および低温飽和状態の降温過程と昇温過程における供試体中心部の解析値を実測値とともに Fig.2 に示す。

常温の降温過程と昇温過程、低温の昇温過程では解析値が実測値と一致することから、熱特性値の基本モデルについては、顕熱区間の妥当性が確認できた。低温の降温過程では、供試体中心温度が平衡に至る過程において、解析値と実測値との差が大きくなる傾向を示した。この結果からは、過冷却による熱特性値の温度依存性の考慮が现阶段でも不十分であることが考えられる。

#### 7. おわりに

作成した熱特性値の基本モデルにおいて、顕熱区間の妥当性は確認できた。ただし、低温飽和状態の降温過程における精度向上を図らなくてはならない。また、潜熱区間のモデル化は検討中の課題である。

#### 参考文献

- 1) 緒方英彦、兵頭正浩、小林哲夫、竹津ひとみ：ポーラスコンクリートにおける空隙の飽和・不飽和状態が熱拡散率に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集 No.69、pp.243-250 (2016)
- 2) 日本熱物性学会：新編熱物性ハンドブック、養賢堂、pp.65-75、pp.565-567 (2008)