

熱特性値の温度依存性を考慮した飽和ポーラスコンクリートの温度解析

Thermal analysis of saturated permeable concrete of the thermal characteristics value considering thermal dependence

○菊池 史織ラニヤ*, 兵頭 正浩**, 緒方 英彦**

KIKUCHI shioriraniya*, HYODO Masahiro** and OGATA Hidehiko **

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り返し作用（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。

これまでの研究より、飽和状態のポーラスコンクリートの温度には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¹⁾。潜熱変化の温度解析を行うためには、その前後の顕熱変化の熱特性値が必要となる。よって潜熱変化の評価に取り組む前段として、常温飽和状態と低温飽和状態における顕熱変化の熱特性値を明らかにした²⁾。この熱特性値を用いて温度解析をした結果、解析温度は常温飽和状態において昇温過程、降温過程ともに実測温度と一致する傾向を示した。一方、低温飽和状態の昇温過程では両者が一致する傾向を示したが、降温過程では両者に顕著な差が生じた。その原因として、氷と水の熱特性値は氷の方が温度低下につれて熱特性値の変動が大きくなることが挙げられる³⁾。よって、低温飽和状態の降温過程ではポーラスコンクリートの温度に応じて熱特性値を変化させた解析を行う必要があることが示唆された。しかし、従来の温度解析では、密度、比熱、熱伝導率の入力パラメータをポーラスコンクリートの温度に関わらず一定値としていることから、厳密な解析には至っていない。

よって、本研究では実測温度と解析温度の間に差が生じる低温飽和状態の降温過程を対象に、熱特性値の温度依存性を考慮した温度解析における熱特性値の設定方法について検討した。

表1 示方配合

Target void (%)	W/C (%)	V_m/V_g (vol.%)	V_s/V_m (vol.%)	Unit weight (kg/m ³)				
				W	B		S	G
					C	P		
20	30.0	47.5	17.5	103	322	20	117	1,456

 V_m/V_g : volume ratio of mortar and coarse aggregate V_s/V_m : volume ratio of mortar and fine aggregate

2. 供試体と温度解析の概要

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表1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。低温飽和状態の実測温度の測定には不凍結溶液を使用し、供試体中心温度を-5°Cにしたものを-35°Cの不凍結溶液水槽に入れ、外水温と供試体中心温度が同じになるまで温度降下させた。

ポーラスコンクリート内部の温度解析には3次元温度応力解析プログラム（ASTEAMACS、計算力学研究センター）を用いた。

温度解析に用いるポーラスコンクリートの入力パラメータは、既往の研究²⁾より温度依存性を考慮せずに同定した低温飽和状態の熱伝導率6.0kcal/mh°C、比熱1.3kcal/kgと、実測値である密度2,178kg/m³、初期温度-5°Cである。熱特性値の温度依存性の考慮は、熱伝導率と比熱に対して行い、実測温度に合うように変化させることで行った。

温度依存性を考慮した温度解析

3.1 解析プログラムにおける熱特性値の設定

図1は、低温飽和状態の降温過程における供試体中心部の実測温度と温度依存性を考慮した解析温度を比較したものである。図中には、比較対象として温度依存性を考慮していない温度解析の結果についても示している。

*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、熱伝導解析

この実測温度と解析温度の関係より、温度依存性を考慮しない場合では、 -25°C 付近から -35°C までの解析温度の曲線を適切に表現できなかつたが、温度依存性を考慮した場合には、実測温度と解析温度は一致した。このように、温度依存性を考慮することで実測温度に近づけることができた。

解析プログラムにおける熱特性値の温度依存性の考慮は、温度区分を -40°C 、 -30°C 、 -20°C 、 -10°C 、 0°C の 10°C 間隔で熱伝導率と比熱を変化するようにした。熱伝導率は既往の研究²⁾より同定した $6.0\text{kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}$ を温度区分に合わせて倍率を任意に変えることで設定した。 0°C から -20°C までは1.5倍、 -30°C の時は0.75倍、それより低温だと0.25倍にした。熱伝導率の変化を図2に示す。

また、比熱においては各温度区分に対してエンタルピーを計算するようにした。図3に示すように温度が低くなるごとに倍率を1.0、0.9、0.8、0.7、0.6倍と基本的に直線的に比熱が変化すると仮定した。それによってエンタルピーは 0°C の時 $39.0\text{kcal}/\text{kg}$ 、 -10°C では $27.3\text{kcal}/\text{kg}$ 、 -20°C では $16.9\text{kcal}/\text{kg}$ 、 -30°C では $7.8\text{kcal}/\text{kg}$ 、 -40°C では $0\text{kcal}/\text{kg}$ となる。

3.2 設定した熱特性値の考察

熱伝導率は、温度が低下するにつれて急激に小さくなる傾向を示した。その原因は、実測温度の測定が供試体中心温度1点で温度変化を評価しているためだと考えられる。外水温から熱が加わっていくにつれて供試体内部は過冷却状態となり、温度が下がりにくくなる。よって、温度が下がるにつれて実測温度の変化はかなり緩やかになる。このことから、温度依存性を考慮した熱伝導率は、低温飽和状態において著しく小さくする必要がある。

比熱は通常固体において温度変化により極端に変化しない。しかし、本研究では直線的に小さくしていくことで実測温度に合わせた。その理由として、比熱は氷の状態では温度低下することによって徐々に小さくなるためである³⁾。

3. まとめ

目標空隙率20%のポーラスコンクリート(粗骨材が7号碎石)において、低温飽和状態では温度依存性を考慮した温度解析が必要であることが分かった。

しかし、本研究で設定した熱特性値の温度依存性の設定方法はまだ任意であるため、今後の研究により詳細に検討していき、より現実に即した温度解析手法の確立を図る予定である。

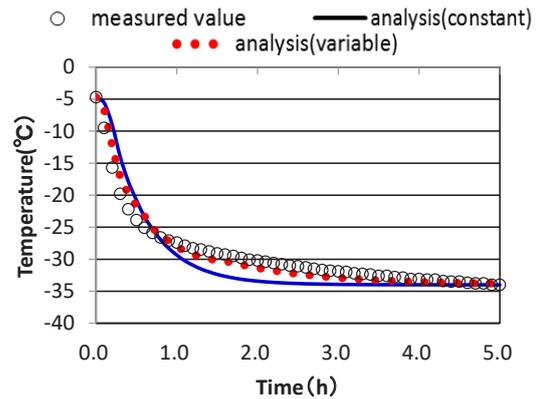


図1 低温・飽和状態の降温過程における温度依存性を考慮した実測温度と解析温度

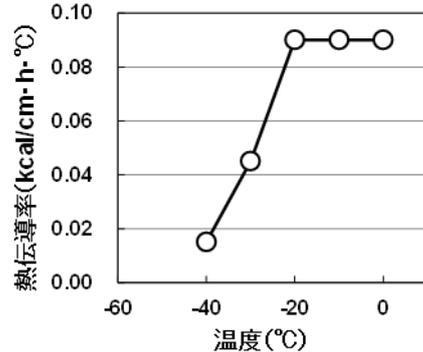


図2 低温・飽和状態の降温過程における熱伝導率の変化

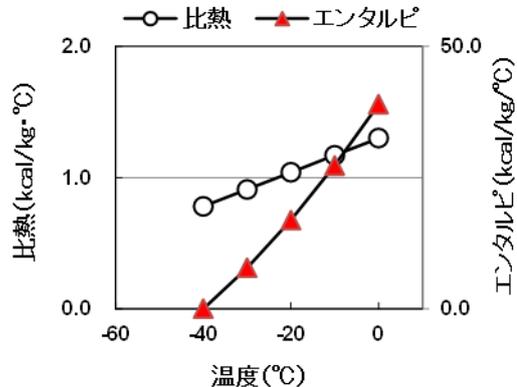


図3 低温・飽和状態の降温過程における比熱とエンタルピー

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) 菊池 史織ラニヤ、兵頭 正浩、緒方 英彦：凍結融解環境下にある飽和したポーラスコンクリートの温度解析に関する基礎的研究、第71回セメント技術大会(投稿中)
- 3) 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)