

凍結防止剤の温度変化に及ぼす 凍結融解サイクルの影響

日本大学工学部 学生員 ○子田 康弘
日本大学工学部 正会員 原 忠勝

1. はじめに

近年、スパイクタイヤの使用が禁止され、冬期の路面凍結を防止するために、凍結防止剤（融雪剤、融氷剤）の使用が増加している。凍結防止剤の散布は、凍結融解の回数が人為的に行なわれた分だけ、自然状態よりも多くなる。

本研究は、凍結防止剤がコンクリート中の凍結融解の繰り返しに及ぼす凍結融解サイクルの影響を検討し凍結防止剤を用いた場合、コンクリートの凍結融解試験における凍結融解サイクルに対する基礎資料を得ることにある。ここでは、凍結防止剤として塩化ナトリウム（NaCl）を取り上げ、一次元非定常熱伝導方程式を用いたアプローチによる解析モデルを用い、凍結融解サイクルを変化させた場合のコンクリート中の温度変化について比較検討を行なった。

2. 解析モデル

NaCl水溶液の温度変化を式（1）に示した一次元非定常熱伝導方程式を用いて計算した。

$$\text{基礎方程式： } \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

初期条件： $t \leq 0, 0 \leq x \leq \infty, T = T_{\infty}$

境界条件： $t < 0, x = 0$ のとき $\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(T - T_{\infty})$

$x = \infty$ のとき $T = T_{\infty}$

仮定条件： 熱移動は一方向のみ、溶液深さは半無限、物性値は一定

T : 温度 (°C), t : 時間 (sec), x : 距離 (m)

a : 熱拡散率 (m²/sec), α : 熱伝達率 (W/m²K), λ : 熱伝導率 (W/mK)

ここで基礎方程式は、以下のように、差分法を用いて解析した。

(1) 式を差分化すると

$$T_{i+1,j} = T_{i,j} + r(T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}) \quad (2) \quad T_{i+1,0} = T_{i,0} + 2r \left[T_{i,1} - T_{i,0} - \frac{ha}{\lambda} (T_{i,0} - T_{\infty}) \right] \quad (3)$$

$$r = a \cdot k / h^2 \quad h = \Delta x, \quad k = \Delta t \quad \text{ただし, } 0 < r \leq 1/2 \text{ の条件を満たすこと}$$

式（2）、式（3）より、時間経過と共に変化する溶液内の温度分布が得られる。

3. 実験結果および考察

3.1 実験の概要

凍結融解試験は、図-1に示すように、10×10×10cmの角柱供試体を使用し、NaCl水溶液濃度を0、3、9%として、-20°C～20°Cの温度変化で凍結融解サイクルを、1、2、6サイクル/日に変化させた。実験では、供試体内部に毛管作用によってNaCl水溶液を浸透させ、内部が十分飽和した状態で行った。計測は、熱電対熱センサーを用い、底面より5mm、20mm、50mmの点で測定した。コンクリートには、Gmax=20mm、W/C=55%、s/a=45.5%、Slump=8cm、空気量=5%、f'c=34.04N/mm²のものを用いた。

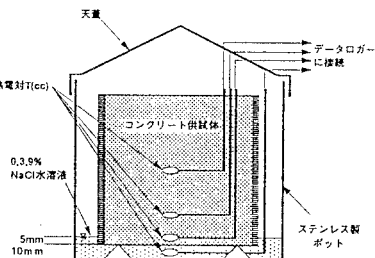


図-1 実験方法

3. 2 計算結果と実験結果の比較

数値解析上の仮定条件は、実験から、不凍液の温度変化にNaCl水溶液が非常によく追従していることより、NaCl水溶液の温度変化を不凍液の温度変化と考えた。そして、コンクリートの低温領域における温度変化は、内部の水分の影響を受けやすい[1]ことから、コンクリート内部のNaCl水溶液の温度変化が、外部のNaCl水溶液の温度変化の影響を受けるものと考えた。さらに、実験条件は、非常に熱の移動が大きいため、通常、2~7 W/m²Kである熱伝達率を、NaCl水溶液濃度、0% : 40 W/m²K、3%、および9% : 50 W/m²Kと計算値が発散しない最大値まで上げて計算を行った。

計算条件は、NaCl濃度を実験条件と同じ、0%、3%、9%とし、凍結融解サイクルを1~7 cycle/dayとした。なお、表-1には、計算に用いた、NaCl水溶液の濃度の比熱、比重、熱伝導率、熱拡散率を示した。

数値計算は、各濃度ごとに、1~7 cycle/dayまで行った。ここでは、NaCl水溶液濃度3%の1、2、6 cycle/dayの計算結果および実験結果を図-2に示した。図より、実験値の温度は、どの測点でもほぼ同一の変化を示し、計算結果と比較すると計算上の5mmの位置の温度変化に近似していた。図-3は、1~7 cycle/dayの計算結果と1、2、6 cycle/dayの実験結果の温度周期が1サイクル終わった時点における供試体底面より5mmの位置の最高、最低温度を示した。図より、4 cycle/dayから、最高、最低温度の差が急に小さくなる傾向を示した。NaCl水溶液の凝固点は、濃度10%以下の場合0℃~-5℃の間にある。したがって、完全な凍結融解が行われているのは、4 cycle/day以下であると考えられる。

4.まとめ

本研究は、凍結防止剤の温度変化に及ぼす凍結融解サイクルを、一次元非定常熱伝導方程式を使った、簡単なモデルでの解析を行った。その結果を以下に述べる。

- (1) コンクリート内部をNaCl水溶液で満たされていると仮定した計算結果は、比較的良くNaCl水溶液の温度変化を表現できる。
- (2) その結果から見て、一日に行える凍結融解サイクルの上限は、3.5 cycle/dayが妥当であると考えられる。

【参考文献】

[1] 森永、山崎、林：コンクリートの熱的性質、技報堂出版、1983年12月、pp31~42

表-1 NaCl水溶液の物性値

| 濃度 (wt%) | 比熱 (kJ/kg·K) | 比重 (g/cm ³) | 熱伝導率 (W/m·K) | 熱拡散率 (mm ² /S) |
|----------|--------------|-------------------------|--------------|---------------------------|
| 0 | 4.2000 | 1.0000 | 0.634 | 0.1340 |
| 3 | 4.1865 | 1.0182 | 0.5796 | 0.1360 |
| 9 | 3.7853 | 1.0513 | 0.5716 | 0.1413 |

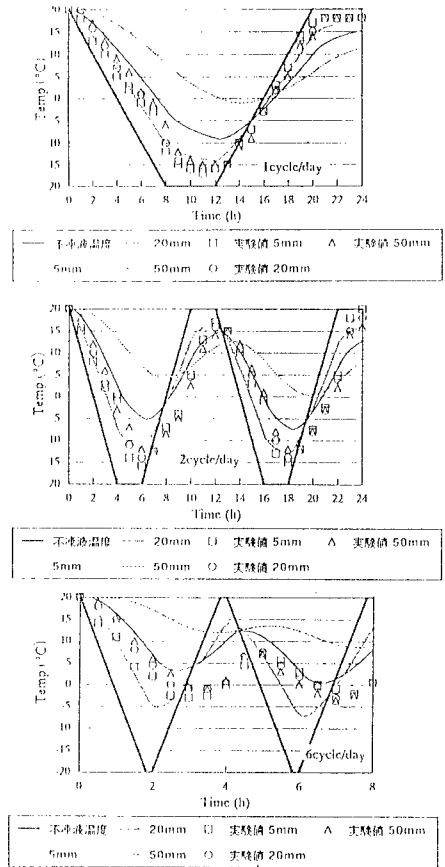


図-2 NaCl 3%の温度変化

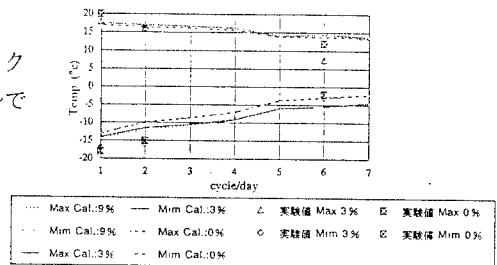


図-3 最低、最高温度