

## 塩分がコンクリートの水分平衡特性に及ぼす影響の検討

長岡技術科学大学大学院 学生会員 ○原田 健二  
長岡技術科学大学 正会員 下村 匠

## 1. はじめに

コンクリート中への塩分の浸透は水分の移動と関連している。しかし、水分と塩分の移動の相互関係を扱った既往の研究の多くは、移流と拡散を区別することで水分の移動が塩分の移動に及ぼす影響を考慮しているものが大半で、塩分の存在が水分の移動に及ぼす影響を考慮している例はない。塩分の存在がコンクリート中の水分の状態に及ぼす影響のひとつに蒸気圧降下がある。その結果、塩分が存在するとコンクリートの平衡時の含水量が変化することが予想される。そこで本研究では、コンクリート中の水分に含まれる塩分がコンクリートの水分平衡特性に及ぼす影響について検討した。

## 2. 塩分を含んだコンクリートの水分平衡特性に関する実験

## 2.1 実験方法

コンクリート中の塩分がコンクリートの水分平衡特性に及ぼす影響を検討するために、モルタル供試体の細孔中を濃度の異なる塩水で満たし、平衡状態になるまで乾燥させる実験を行った。

実験に用いた供試体は  $100 \times 100 \times 5 \text{ mm}$  のモルタルである。配合を表-1に示す。実験工程を以下に示す。

28日封かん養生が終了した供試体を  $110^\circ\text{C}$  の乾燥炉で9日間乾燥させた。このときの重量を絶乾重量とした。乾燥させた供試体を温度  $20^\circ\text{C}$  の環境で濃度 0% (密度:  $1000 \text{ kg/m}^3$ )、濃度 10% (密度:  $1068 \text{ kg/m}^3$ )、飽和濃度 (26.4%) (密度:  $1198 \text{ kg/m}^3$ ) の NaCl 溶液中にそれぞれ浸漬し、6日間吸水させた。その後、それぞれの供試体を温度  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 92% (恒温恒湿槽)、75% (NaCl による飽和塩法)、50% (恒温恒湿室)、33% ( $\text{MgCl}_2$  による飽和塩法)、11% (LiCl による飽和塩法) の環境の順番で段階的に供試体重量が平衡に至るまで乾燥させた。供試体の 24 時間当たりの重量変化が  $0.1 \text{ g}$  より小さくなったときの重量を平衡重量とみなした。

実験に用いた NaCl 溶液はイオン交換水と純度 99% 以上の NaCl 結晶を用いて作製した。溶液の濃度は溶質の質量を溶液 (溶媒+溶質) の質量で除した質量濃度で表している。

## 2.2 実験結果とメカニズムの考察

図-1 に種々の濃度の塩水を用いたモルタルの各湿度環境下における平衡相対液状水量を示す。同一相対湿度環境下において

でも、コンクリート中を満たす水分の塩分濃度が高いほど平衡相対液状水量は大きいことが確認された。用いた供試体の細孔構造は同じであるとすれば、この実験結果は、図-2 に示すように、細孔中の溶液に塩分が存在することで平衡時に液状水が存在する最大細孔半径( $r_s$ )が大径側にシフトしたことを示している。このときの水蒸気分圧が塩分濃度によらず同一であるとすれば、これは塩分の存在により飽和水蒸気圧が低下したためと考えられる。そこで、次章では塩分が溶液の飽和水蒸気圧の低下に及ぼす影響について検討を行う。

表-1 供試体配合

| W/C (%) | s/c | 単位量( $\text{kg/m}^3$ ) |     |      |
|---------|-----|------------------------|-----|------|
|         |     | W                      | C   | S    |
| 50      | 3.0 | 283                    | 566 | 1430 |

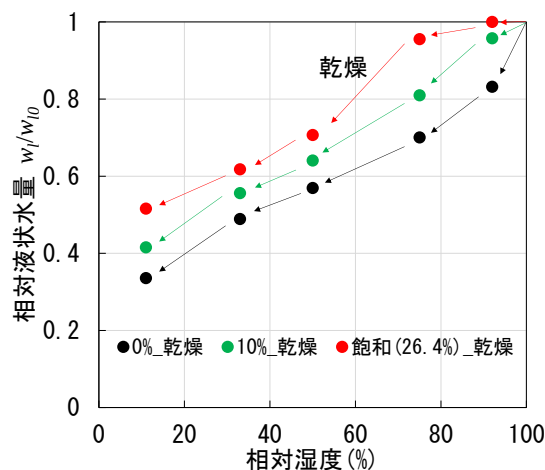


図-1 水分平衡特性(実験値)

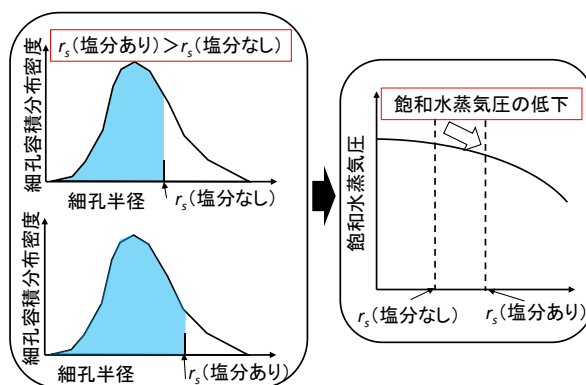


図-2 塩分の影響

キーワード 蒸気圧降下, 塩分, 平衡相対液状水量, 水分

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 コンクリート研究室 TEL 0258-47-1611-6310

### 3. 塩分の溶解による溶液の飽和水蒸気圧の低下に関する実験

塩分の溶解による溶液の飽和水蒸気圧の低下を測定するために温度 20℃ の環境で種々の濃度 (0%, 3%, 5%, 10%, 15%, 20%, 飽和 (26.4%)) の NaCl 溶液を密閉空間 (容量 2.08L) に 1L 入れ, 容器内の相対湿度を測定した. 相対湿度の測定には, 静電容量式湿度計を用いた.

図-3 に各濃度の NaCl 溶液を入れた容器内の相対湿度の経時変化を示す. 経過時間が 15 時間を超えると測定値にほとんど変化がなくなったことから, 経過時間 20 時間のときに測定された湿度を平衡湿度とした.

図-4 は溶液の塩分濃度と, 平衡湿度より算出した飽和水蒸気圧の関係を示したものである. 塩分濃度の増加に伴い飽和水蒸気圧が低下することが確認できた. 両者の関係は以下の多項式(1)により近似できる.

$$p_{v0} = 2336 - 4.3 \times 10^{-1} C_{NaCl}^2 - 10.7 C_{NaCl} \quad (1)$$

ここで,  $C_{NaCl}$ : 溶液の NaCl 濃度[質量%],  $p_{v0}$ : 溶液の飽和水蒸気圧[Pa]

### 4. 塩分を含んだコンクリートの水分平衡特性の再現計算

#### 4.1 計算仮定

2 章で示した実験で確認された塩分を含んだコンクリートの水分平衡特性を, 3 章の実験結果に基づき以下の方法で再現することを試みる.

まず, 外気の相対湿度を与え, 温度 20℃ のもとでの水蒸気分圧  $p_v$  を求める. 次に, 式(1)を用いて細孔中の NaCl 濃度  $C_{NaCl}$  の溶液が呈する飽和水蒸気圧  $p_{v0}$  を求める. これらを式(2)に示す Kelvin 式に代入し凝縮細孔半径  $r_s$  を求める. 次にそれを式(3)に示す細孔容積分布モデルに代入し, 平衡時の相対液状水量  $w_l/w_{l0}$  を求める.

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

$$\frac{w_l}{w_{l0}} = \frac{\rho_l}{\rho_{l0}} \{1 - \exp(-Br_s^C)\} \quad (3)$$

ここで,  $\gamma$ : 溶液の表面張力[N/m],  $M_w$ : 水の分子量[kg/mol],  $R$ : 気体定数[J/mol·K],  $T$ : 絶対温度[K],  $\rho_{l0}$ : 溶液の初期密度[kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_l$ : 乾燥後の溶液の密度[kg/m<sup>3</sup>],  $p_v$ : 大気の水蒸気分圧[Pa],  $r_s$ : 凝縮細孔半径[m],  $B, C$ : 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ.  $B, C$  は, 塩分濃度 0% で吸水を行った供試体の飽和時の重量および平衡時の重量より推定した値を用いる. 蒸発に伴い細孔中の溶液の NaCl 濃度と密度が増加することを考慮する. また, 溶液の表面張力と密度も NaCl 濃度に応じて変化させる.

#### 4.2 再現計算結果及び考察

図-5 に各相対湿度に平衡する相対液状水量の実験値と計算値の比較を示す. 計算値が実験値を概ね再現できていることが確認できる. このことから, 塩分の存在がコンクリートの水分平衡特性に及ぼす影響は, 塩分の溶解による飽和水蒸気圧の低下により説明できるといえる.

実際の海水や凍結防止剤を含んだ路面水の塩分濃度は 3~6% 程度であり, 今回の実験よりも低濃度であるので, 通常は水分平衡特性に及ぼす塩分の影響は小さいといえるが, 乾湿の繰返しによってコンクリート表面付近は高濃度になる場合もあるため, 乾湿挙動を精密に予測するには塩分によるコンクリートの水分平衡特性の変化を考慮すべきであると考えられる.

塩分がコンクリート中の水分移動に及ぼす影響の全容を表現するためには水分平衡特性だけでなく, 乾燥速度や吸湿速度に及ぼす影響, ならびに潮解を考慮しなければならない. これらについても検討を進めている.

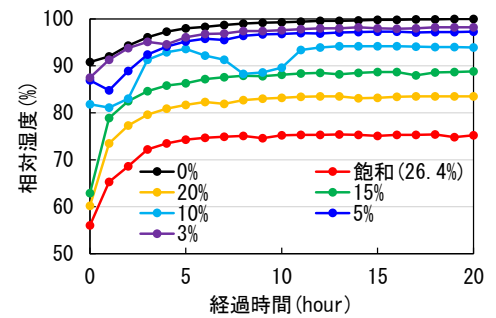


図-3 相対湿度の経時変化

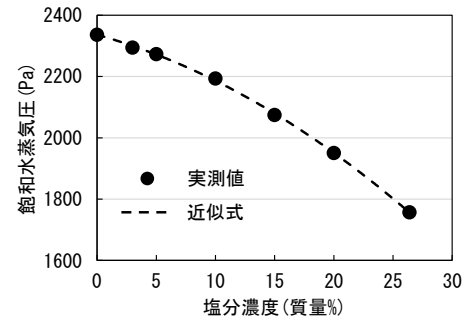


図-4 塩分濃度-飽和水蒸気圧

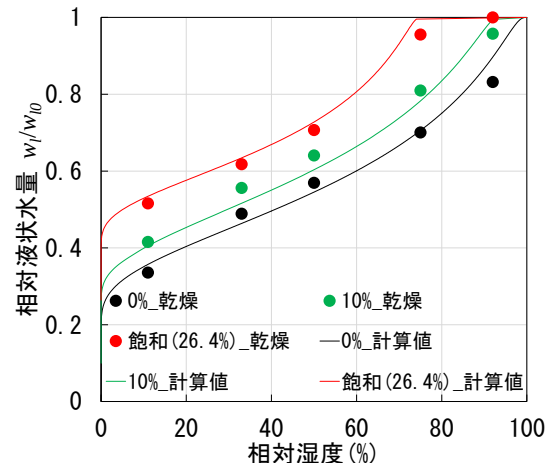


図-5 水分平衡特性(実験&計算)