

論文 練混ぜ水として高濃度 NaCl 水溶液を用いた高炉セメントコンクリートの乾燥収縮に関する一検討

原田 健二*1

要旨：乾燥収縮の抑制方法の発展に寄与するために、粉体として高炉セメント、練混ぜ水に高濃度 NaCl 水溶液を用いたモルタルの乾燥収縮特性について実験と数値計算により検討を行った。温度 20℃、相対湿度 59% の環境下であれば、練混ぜ水として濃度 20%以上の NaCl 水溶液を用いることで水分の逸散を大幅に抑制し、それに伴い乾燥収縮量を半分程度抑制できることが実験により明らかになった。NaCl が水分移動に及ぼす影響を考慮した水分移動解析に立脚した乾燥収縮解析を用いた数値実験より、練混ぜ水として用いる高濃度 NaCl 水溶液による乾燥収縮の抑制効果は乾燥湿度が低いほど効果がなくなる可能性が示唆された。

キーワード：高濃度水溶液、高炉スラグ微粉末、乾燥収縮、蒸気圧降下、NaCl

1. はじめに

コンクリートは、諸特性を経済的に改良・改善するために実環境に応じて適切な混和材料を複数併用することが一般的である。そのため、一つの対策によりコンクリートの諸特性を大きく改良・改善する方法はあまりない。しかし、水溶液の特性を利用することで、一つの対策によりコンクリートの諸特性を大きく改良・改善する可能性がある。

溶質が大量に溶け込んだ水溶液は水道水と乖離した物理化学的特性値をもつ。例えば、高濃度な水溶液になると蒸気圧降下により飽和水蒸気圧が低下すること溶媒の蒸発速度が低下し、水溶液の飽和水蒸気圧が外気の水蒸気分圧より低くなる場合は大気中の水蒸気が水溶液に凝縮する。それだけでなく、溶質の存在は溶解速度の低下、凝固点降下に伴い水溶液の凍結温度が低下、溶存酸素量の減少などの水溶液の特性の変化にも影響を及ぼす。

以上の特徴より、コンクリートの練混ぜ水が高濃度な水溶液であれば、コンクリートの自由水の蒸発速度が低下することで、コンクリートのプラスチック収縮、乾燥収縮を抑制することでコンクリートの乾燥収縮のひび割れを抑制できると考えられる。また、水和時のセメントの溶解速度を低下することで水和による発熱を緩やかにすることで温度ひび割れも抑制できると考えられる。さらに、極端に高濃度な水溶液を練混ぜ水に用いると、練混ぜ水の飽和水蒸気圧が大気の水蒸気分圧より低くなることで、大気中の水蒸気がコンクリート表面に凝縮することでコンクリート表面から水分を供給する自己養生ができると考えられる。それだけでなく、凝固点降下により自由水の凍結温度を大幅に低下させることで凍害の対策となると考えられる。加えて、自由水中の溶存酸素の

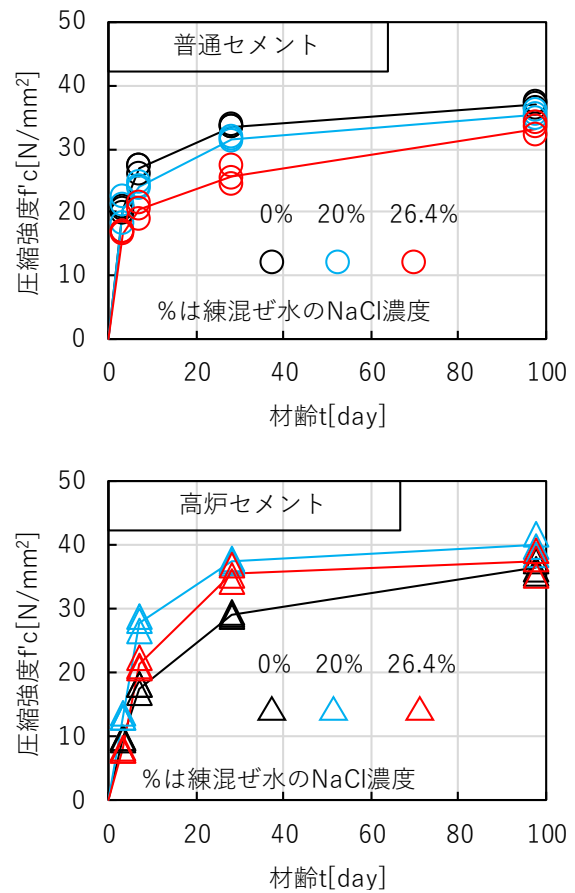


図-1 高濃度水溶液が強度発現に及ぼす影響の違い

減少により鋼材腐食の抑制も期待できると考えられる。

練混ぜ水に溶質を含んだコンクリートに関する既往の研究としては海水練りコンクリートに関するものが多くあり、練混ぜ水の濃度が高いものとしては 10%程度のものであり、極端に高濃度な水溶液を練混ぜ水に用いた研究の知見は少ない。例えば、極端に高濃度な水溶液を

*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 (正会員)

表-1 配合

| 練混ぜ水の NaCl濃度 [質量%] | 練混ぜ水の 密度 [g/cm ³] | % | | | 単位量[kg/m ³] | | | | | 単位量 [g/m ³] |
|--------------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------------|
| | | 空気量 | w/p | s/a | W | C | B | S | G | |
| 0 | 1.00 | 6 | 158 | 45 | 175 | 185 | 151 | 777 | 972 | 16 |
| 20 | 200 | | | | | | | | | |
| 26.4 | 210 | | | | | | | | | |

W：水道水+NaCl結晶（純度99%），C：普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³），B：石こう添加率4%高炉スラグ微粉末（密度2.89g/cm³）S：山砂（密度2.64g/cm³，吸水率1.94%）G：石灰岩（密度2.70g/cm³，吸水率0.52%），Ad：AE剤

練混ぜ水に用いた既往の研究^{2), 3)}より、粉体として普通ポルトランドセメント、練混ぜ水として20%以上の高濃度 NaCl 水溶液を用いると、コンクリートの強度発現は遅くなるが、水分の逸散の抑制に伴い、屋外気中養生においても封かん養生と同程度の養生効果を発揮し、乾燥収縮の抑制および水和による発熱を抑制することなどが明らかになっている。粉体として高炉セメント、練混ぜ水として20%以上の高濃度 NaCl 水溶液を用いた既往の研究⁴⁾では、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同様に水分の逸散の抑制に伴い、屋外気中養生においても封かん養生と同程度の養生効果を発揮することが明らかになっている。しかし、**図-1**⁵⁾に示すようにコンクリートの7日以降の強度発現が早くなり、普通ポルトランドセメントを用いた場合と強度発現の仕方が異なることが明らかになっている。そのため、粉体として高炉セメント、練混ぜ水として高濃度 NaCl 水溶液を用いることで、普通ポルトランドセメントで確認された乾燥収縮の抑制が同様に確認できるか不明である。

以上のことから、本研究では、練混ぜ水として用いる高濃度 NaCl 水溶液が高炉セメントコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を実験的に検討する。

2. 練混ぜ水として用いた高濃度 NaCl 水溶液がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する実験

2.1 実験概要

高濃度 NaCl 水溶液が高炉セメントコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を把握するために練混ぜ水として高濃度 NaCl 水溶液を用いたモルタル供試体を温湿度が一定の環境下で暴露させる実験を行った。

実験には40×40×160mmのモルタル供試体を用いた。モルタルは**表-1**に示す配合のコンクリートを5mmふるいでウェットスクリーニングしたものを用いた。

28日封かん養生した供試体を**図-2**に示すような密閉容器中に設置し、温度20°C、相対湿度59%の環境でそれぞれ2本ずつ98日乾燥させた。実験期間中、供試体の質量およびコンタクトゲージ法（基長10cm，測定器の最小目盛1/1000mm）により収縮量の測定を行った。

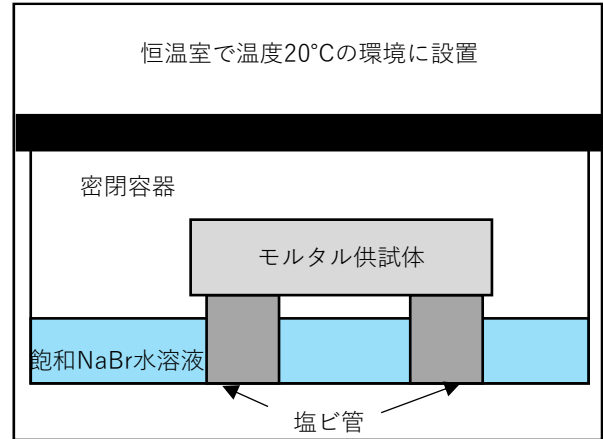


図-2 供試体乾燥方法

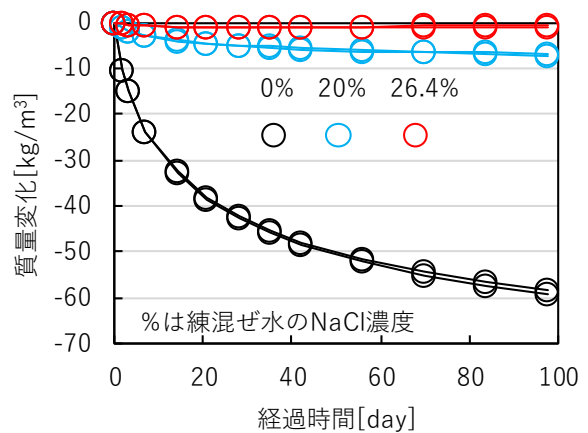


図-3 質量変化の経時変化

2.2 実験結果および考察

種々の濃度の NaCl 溶液を練混ぜ水に用いたモルタルの質量変化の経時変化を**図-3**、収縮量の経時変化を**図-4**、質量変化と収縮量の関係を**図-5**に示す。

図-3より、練混ぜ水が水道水のものと比較すると練混ぜ水の NaCl 濃度が高くなるほど乾燥による水分の逸散の抑制は顕著になる。乾燥を抑制する理由としては、練混ぜ水として高濃度 NaCl 水溶液を用いることで大気の水蒸気分圧とモルタル中の自由水の飽和水蒸気圧の差が小さくなることで乾燥速度が低下することと平衡時の液状水量が多くなること⁵⁾が関係していると考えられる。

図-4より、練混ぜ水が水道水のものと比較すると練混ぜ

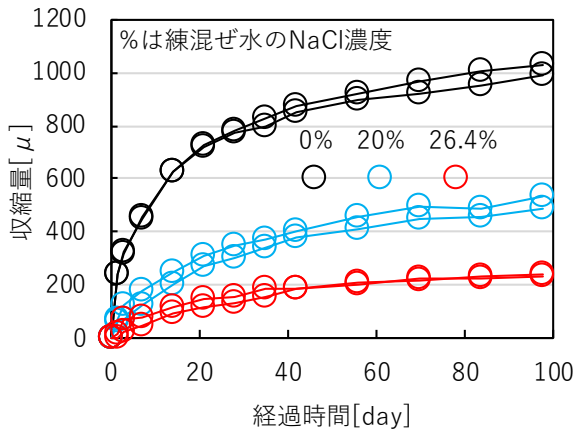


図-4 乾燥収縮量の経時変化

水の NaCl 濃度が高くなるほど乾燥による水分の逸散の抑制に伴い乾燥収縮量も抑制される。図-5 より、練混ぜ水の濃度が高くなるほど、質量変化に対しての収縮量の変化が大きくなる。この理由は定かではないが、図-1 に示すように練混ぜ水として 20% 以上の高濃度 NaCl 水溶液を用いることで 7 日以降の高炉セメントコンクリートの強度発現が早まることと気液界面での毛管力は毛管径が小さくなるほど大きくなることと関係していると考えている。練混ぜ水の NaCl 濃度が高いものの強度発現が早まるということは水和の進行も促進され、空隙構造が緻密になり、空隙湿度が低下していると考えられる。これらのことから、乾燥開始時点で練混ぜ水が高濃度 NaCl 水溶液を用いた供試体は練混ぜ水として水道水を用いたものより空隙構造が緻密かつ空隙湿度が低下することで気液界面の毛管半径が細密径側にシフトすることで、同一の水分逸散量でも収縮に起因する毛管力が大きくなっていると考えている。

3. 水分移動解析

3.1 解析概要

コンクリート中の液状水に溶解している NaCl の影響を考慮した水分移動モデル⁶⁾を用いる。

本モデルでは、コンクリートの細孔構造を以下の細孔容積分布関数により表している。

$$V(r) = V_0 \{1 - \exp(-Br^C)\} \quad (1)$$

ここに、 $V(r)$: コンクリート単位体積中における細孔半径が r 以下の累積細孔容積 [m^3/m^3]、 r : 細孔半径 [m]、 V_0 : コンクリート単位体積中における総細孔容積 [m^3/m^3]、 B 、 C : 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ [無次元] である。

コンクリート細孔組織中における気液平衡は毛管凝縮理論により表されるものとし、気液界面の形成される細孔半径と細孔内相対湿度の関係は Kelvin 式 ((2)) により表す。式(2)で表される細孔半径より小さい細孔は乾湿

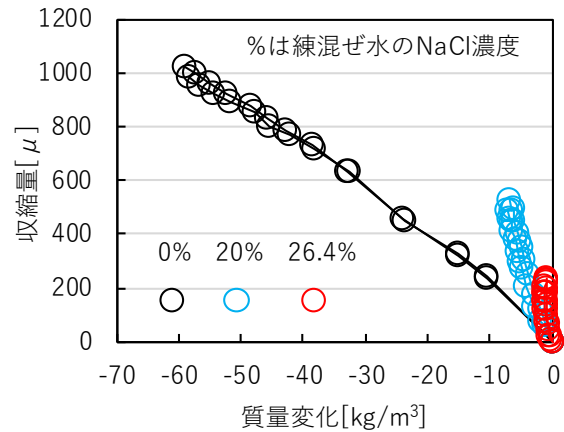


図-5 乾燥収縮量と質量変化の関係

の経路によらず常に液状水に満たされているとすると、細孔容積分布モデルより、平衡時の液状水量は式(3)で表される。

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

$$w_l = \rho_l V_0 \{1 - \exp(-Br_s^C)\} \quad (3)$$

ここに、 r_s : 液状水が存在する最大細孔半径 [m]、 γ : 液状水の表面張力 [N/m]、 M_w : 水の分子量 [kg/mol]、 R : 気体定数 [$\text{J/mol}\cdot\text{K}$]、 T : 絶対温度 [K]、 ρ_l : 液状水の密度 [kg/m^3]、 p_v : 水蒸気分圧 [Pa]、 p_{v0} : 飽和水蒸気圧 [Pa]、 w_l : コンクリート単位体積当たりの液状水質量 [kg/m^3] である。

本モデルでは、コンクリート中の水分の移動は水蒸気と液状水の移動をそれぞれ考慮している。水分移動の質量保存則は式(4)のようになる。

水蒸気の移動は細孔組織中の分子拡散であるとし、移動流束は式(5)のように表している。液状水の移動は、圧力勾配を駆動力とした層流であるとし、移動流束を式(6)のように表している。

$$\frac{\partial w_l}{\partial t} = -\text{div}(J_v + J_l) \quad (4)$$

$$J_v = -K_v V_g D_{vo} \text{grad}(\rho_v) \quad (5)$$

$$J_l = K_{clef} \int_0^{r_s} \left[\rho_l \frac{dV(r)}{dr} \left\{ -K_l \frac{r^2}{8\mu} \text{grad} \left(-\frac{2\gamma}{r_s} \right) \right\} \right] dr \quad (6)$$

ここに、 J_v : 水蒸気の拡散移動流束 [$\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$]、 J_l : 液状水の移動流束 [$\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$]、 K_v : 水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 [無次元]、 V_g : コンクリート単位体積中における気相体積 [m^3/m^3]、 D_{vo} : 水蒸気と乾燥空気相互拡散係数 [m^2/s]、 ρ_v : 水蒸気の密度 [kg/m^3]、 K_{clef} : 塩分の存在による液状水移動の低減係数 [無次元]、 K_l : 液状水移動に関する特性を表す材料係数 [無次元]、 μ : 液状水の粘性係数 [$\text{Pa}\cdot\text{s}$] である。

境界における水分移動流束を式(7)より表現する。

表-2 再現計算の材料条件 1

| 水準 | 0% | 20% | 26.4% |
|---|--------|------|-------|
| B | 22000 | | |
| C | 0.5 | | |
| V_0 [m ³ /m ³] | 0.2 | | |
| K_v | 0.03 | | |
| K_l | 0.0006 | | |
| K_{Clef} | 1.00 | 0.22 | 0.22 |

表-3 再現計算の初期条件

| 水準 | 0% | 20% | 26.4% |
|-----------|------|------|-------|
| 初期飽和度 | 0.95 | 0.75 | 0.77 |
| 初期濃度[質量%] | 0 | 20 | 26.4 |

表-4 再現計算の材料条件 2

| 水準 | 0% | 20% | 26.4% |
|----------------------------|------|------|-------|
| E_s [MN/m ²] | 6000 | 1700 | 900 |

$$J_s = D_w \frac{w_l - w_{lb}}{h} \quad (7)$$

ここに、 J_s : 境界における水分移動流束[kg/m²・s], D_w : 水分拡散係数[m²/s], w_b : 雰囲気中の相対湿度に平衡するコンクリート単位体積あたりの液状水量[kg/m³], h : コンクリート表面に形成される仮想湿度勾配層の厚さ[m](本研究では0.00075mとした。)である。

水分拡散係数 D_w はコンクリート中における値を境界条件式に用いる。式(5), (6)を液状水量勾配基準に変換することで求める。

図-3の再現計算をするにあたり、温度の変化および塩分の存在による液状水の密度、表面張力、粘性係数、飽和水蒸気圧の変化を考慮した⁵⁾。練混ぜ水の濃度によって水和の進行程度が異なると推察されるため、材料係数を正確に評価するのが本来であるが、本研究の段階では、計算に用いる材料係数は練混ぜ水の濃度によらず同様とし、初期空隙湿度(初期飽和度)を変化させることで水和の進行程度の違いを表現するとする。そして、水分の逸散、移動に伴い液状水の NaCl 濃度が変化することによる液状水の物性値および移動係数の変化を考慮した。計算に用いた材料条件は表-2、初期条件は表-3に示す値を用いた。

供試体の質量変化は長手方向の水分移動を無視し、40×40mmの2次元解析により求める。要素差分は2mm、時間差分は1dayとした。

境界条件として用いる温湿度については、実験環境と同様の温度20℃、相対湿度59%とした。

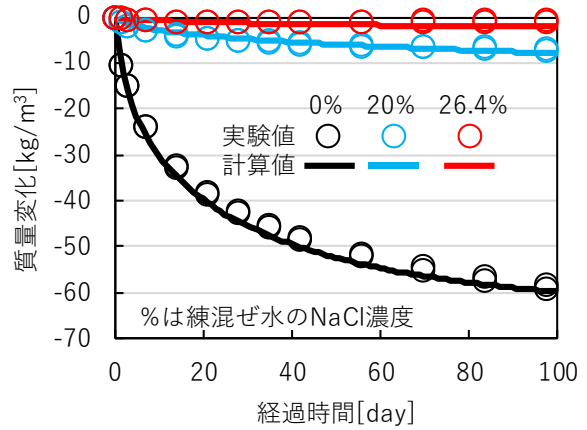


図-6 図-3の再現計算

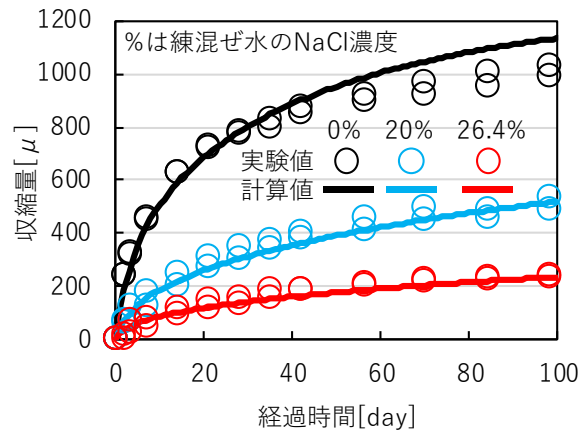


図-7 図-4の再現計算

3.2 再現計算結果

図-6に図-3の再現計算結果を示す。練混ぜ水が水道水、高濃度 NaCl 水溶液のものともに計算値は実験値と概ね一致している。この結果より、練混ぜ水が高濃度 NaCl 水溶液によることによる水和の進行度の違いを初期飽和度(初期空隙湿度)の変化により表現し、液状水中の NaCl の存在による物性の変化を考慮することで粉体に高炉セメント、練混ぜ水として高濃度 NaCl 水溶液を用いたコンクリートの乾燥挙動の傾向を表現できると考えられる。

4. 乾燥収縮解析

4.1 解析概要

コンクリート中の水分の逸散に伴う収縮を考慮した乾燥収縮モデル³⁾を用いる。

本モデルでは、収縮は毛管力に起因するものとし、式(8)により表す。線形弾性変形すると仮定すると、収縮ひずみは式(9)で表される。

$$\sigma_s = V_l \frac{2\gamma}{r_s} \quad (8)$$

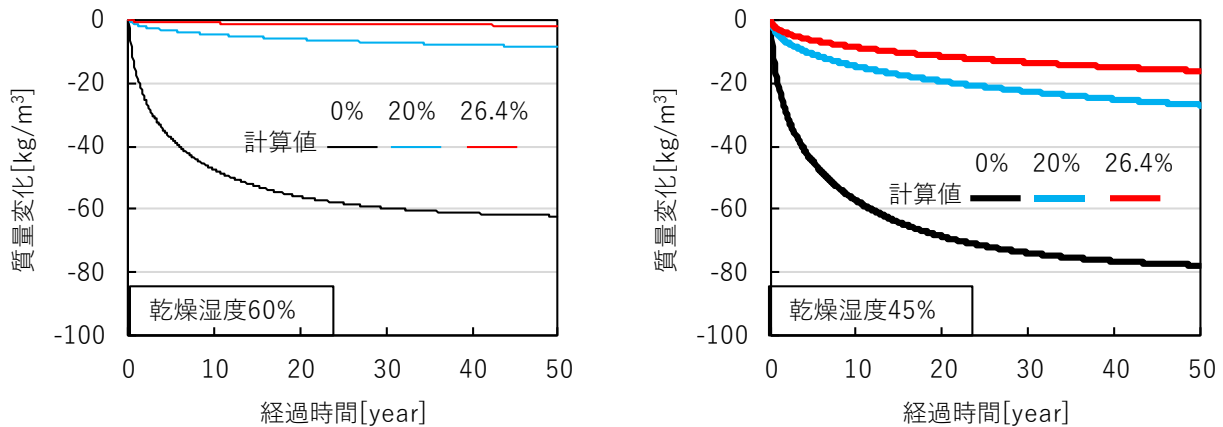


図-8 質量変化の計算結果

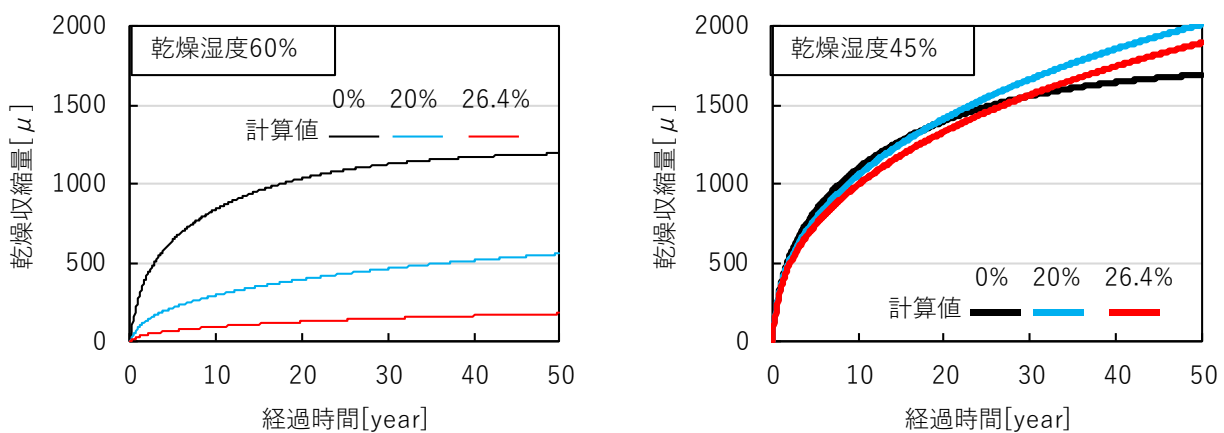


図-9 乾燥収縮量の計算結果

$$\varepsilon_{sh} = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (9)$$

ここに、 σ_s ：毛管力に起因する応力[N/m²]、 V_l ：コンクリート単位体積当たりの液状水体積 [m³/m³]、 ε_{sh} ：乾燥収縮ひずみ[無次元]、 E_s ：毛管力に起因する応力に対する弾性係数[N/m²]である。

毛管力に起因する応力は液状水量が少なくなることによって生じる液状水が存在する最大細孔半径の低下割合は液状水量の低下割合より大きくなるため、本モデルは初期空隙湿度の低下による同一の水分逸散量でも収縮に起因する毛管力が大きくなることを表現できる。

収縮ひずみを計算するにあたり、図-4の計算値と概ね一致するように E_s を表-4に示す値を用いた

供試体の収縮量は、既往の研究⁷⁾と同様に水分移動解析で得られた水分分布より収縮ひずみの分布を求め、長手方向の様な変形を仮定して求める。

4.2 再現計算結果

図-7に図-4の再現計算結果を示す。練混ぜ水が水道水、高濃度 NaCl 水溶液のものともに計算値は実験値と概ね一致している。この結果より、練混ぜ水が高濃度 NaCl 水溶液によることによる水和の促進に伴う細孔構造が緻密になることで生じる気液界面の毛管力の増加に

よる収縮量の増大を初期空隙湿度が低下することで同一乾燥量においても収縮量が増加させることと毛管力に起因する応力に対する弾性係数 (E_s) を減少させることで間接的に表現することで粉体に高炉セメント、練混ぜ水として高濃度 NaCl 水溶液を用いたコンクリートの乾燥収縮挙動の傾向を表現できると考えられる。

5. 練混ぜ水として用いた高濃度 NaCl 水溶液がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する数値実験

5.1 計算概要

3章、4章での実験値の再現計算結果より、塩分の存在を考慮した水分移動解析に立脚した乾燥収縮モデルにより練混ぜ水に高濃度 NaCl 水溶液を用いたモルタルの乾燥及び乾燥収縮の挙動の傾向を表現できることが確認された。本章では、実験値の再現計算で用いた材料係数および初期条件を用いて数値実験を行い、境界条件として与える湿度および断面寸法の違いが練混ぜ水に高濃度 NaCl 水溶液を用いた高炉セメントコンクリートの乾燥収縮挙動に及ぼす影響について検討を行う。

断面寸法については 400×400mm の2次元平面とし、長手方向の水分移動は無視し、様な変形を仮定して乾燥収縮量を求める。境界条件として与える温湿度は 20℃、

45%と20℃、60%の2水準とした。

5.2 計算結果および考察

図-8 に計算値の質量の経時変化、図-9 に計算値の乾燥収縮の経時変化を示す。

図-8 より、いずれの湿度でも練混ぜ水の濃度が高くなるほど質量変化が小さくなる。しかし、同じ濃度の乾燥湿度60%と45%の質量変化を比較すると、乾燥湿度45%と60%の質量変化の比は濃度が高くなるほど大きくなる。この結果は、初期条件として与える初期飽和度（初期空隙湿度）の影響も受けているが、湿度が低くなるほど、練混ぜ水が高濃度水溶液になることで生じる乾燥の抑制効果が小さくなることを示唆していると考えられる。図-9 より、乾燥湿度60%の場合は練混ぜ水の濃度が高くなるほど乾燥収縮量が半分以下になる。しかし、乾燥湿度45%の場合は、乾燥20年程度までは練混ぜ水の濃度が高くなるほど乾燥収縮量は小さくなるが、乾燥が長期化すると乾燥収縮量が濃度0%のものより大きくなる。この理由としては、湿度が低くなるほど練混ぜ水が高濃度水溶液になることで生じる乾燥の抑制効果が小さくなり、練混ぜ水の濃度が高くなるほど同一の乾燥量でも乾燥収縮量が大きくなることが関係していると考えられる。そのため、この結果は、乾燥の抑制に伴う乾燥収縮の抑制は乾燥湿度が高い環境であるほど効果があるが、相対湿度45%のように低い相対湿度が継続する環境下では逆に乾燥収縮量を増大させる危険性を示唆していると考えられる。

以上のことから、練混ぜ水として高濃度 NaCl 水溶液を用いることによる高炉セメントコンクリートの乾燥収縮の抑制は、相対湿度が比較的高い沿岸部や日本北部で期待できる可能性が示唆されたと考えられる。

この結果は数値計算による検討であるため、練混ぜ水が高濃度 NaCl 水溶液になることによるコンクリートの乾燥収縮の抑制効果が実環境下でも発揮するかについては種々の異なる実環境下における実験的検証が必要と考えている。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 実験結果より、温度 20℃、相対湿度 59%一定の環境下では練混ぜ水として高濃度 NaCl 水溶液を用いることでモルタルの水分の逸散を抑制し、それに伴い乾燥収縮を抑制できる。
- 2) 塩分の存在を考慮した水分移動解析に立脚した乾燥収縮モデルにより、練混ぜ水に高濃度 NaCl 水溶

液を用いたモルタルの乾燥及び乾燥収縮挙動の傾向を再現できる。

- 3) 数値実験の結果より、温度 20℃、乾燥湿度が 60%の場合は練混ぜ水の NaCl 濃度が 20%以上になると水分の逸散の抑制に伴い乾燥収縮量を半分以下できるが、乾燥湿度が 45%のように低湿度の環境下では練混ぜ水の NaCl 濃度が高くなることによる水分の逸散の抑制に伴う乾燥収縮の抑制効果はあまりない。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金若手研究「塩化物を利用した新たな環境配慮型コンクリートの開発」（研究代表者：原田健二、課題番号：JP23K13390）を受けて行った。

参考文献

- 1) 山岸祥希, 佐川孝広, 伊藤始：NaCl 添加コンクリートの封かん養生下での圧縮強度発現メカニズムに関する検討, 土木学会論文集 E2, Vol.78, No.1, pp.1-12, 2022.
- 2) 原田健二, 小磯陽介：練混ぜ水として高濃度水溶液を用いたコンクリートの諸特性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.286-291, 2023.
- 3) 原田健二, 小滝遥斗：練混ぜ水として高濃度水溶液を用いたコンクリートの自己養生効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.343-348, 2024.
- 4) 小滝遥斗, 原田健二, 宗藤葉瑠香：練混ぜ水として高濃度 NaCl 水溶液を用いた高炉セメントコンクリートの自己養生効果に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.24, pp.51-54, 2024.
- 5) 小滝遥斗, 原田健二：練混ぜ水として用いた高濃度 NaCl 水溶液がコンクリートの強度発現に及ぼす影響の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, V-283, 2024.
- 6) 原田健二, 下村匠：塩分がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響の解明とそのモデル化, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.4, pp.427-439, 2016.
- 7) 下村匠, 前川宏一：微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No. 520/V-28, pp. 35-45, 1995.