

論文 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

原田 健二*1・小磯 陽介*2

要旨：コンクリートのひび割れに対策する手法の発展に寄与するために、練混ぜ水が高濃度水溶液になる場合のコンクリートの諸特性について実験的に検討した。練混ぜ水として高濃度 NaCl 水溶液を用いた実験結果より、28 日圧縮強度は、濃度が 20%程度であれば、練混ぜ水が水道水のものと同程度であるが、濃度が飽和濃度になると 8 割程度まで低下することが明らかになった。乾燥収縮は、練混ぜ水が水道水のものより乾燥を抑制し、それに伴い乾燥収縮も抑制されることが明らかになった。発熱特性は、水和の遅延が生じ、練混ぜ水が水道水のものより発熱が緩やかになることが明らかになった。

キーワード：練混ぜ水、高濃度水溶液、乾燥収縮、断熱温度上昇特性、圧縮強度

1. はじめに

コンクリートに発生したひび割れは、美観や耐久性の低下などコンクリート構造物の性能を低下させる方向に作用する。コンクリートのひび割れには、コンクリート中の水分の逸散に伴う乾燥収縮ひび割れやセメントの水和熱に起因する温度ひび割れなどがある。

一般的に乾燥収縮ひび割れの抑制は、コンクリート中の水分の逸散を抑制する、膨張剤や収縮低減剤等を使用することででき、温度ひび割れの抑制は、低熱ポルトランドセメントや混合セメントなどを使用し、セメントの水和熱による温度上昇を緩やかにすることでできる。これらの抑制方法は単独で乾燥収縮ひび割れと温度ひび割れ両方に効果は発揮することはできない。

既往の研究^{1) 2) 3)}より、尿素を混入することで、単独で乾燥収縮ひび割れや温度ひび割れ両方の抑制に効果を発揮することが知られている。温度ひび割れの抑制は、尿素の吸熱反応がコンクリートの温度を低下させるとともに水和を遅延することでできるといわれている。乾燥収縮のひび割れの抑制は、尿素が非揮発性であるためにコンクリート中の水分の逸散量を低減することでできるといわれている。

水溶液の特徴として、溶質が存在すると物理化学的特性値が水と乖離し、それは濃度が高濃度になるほど顕著になる。溶質が存在することで生じる物理化学的特性値の変化としては、飽和水蒸気圧の低下、粘度の増大、粘度の増大に伴う拡散係数の低下などがある。そのため、練混ぜ水として高濃度水溶液を用いると、コンクリート中の自由水の飽和水蒸気圧が低下することで平衡湿度が低下し、それに伴い水分の逸散量が抑制され、乾燥収縮ひび割れを抑制できると考えられる。さらに、自由水の

粘度が増加することで溶質の拡散係数が低下し、水和時のセメントの溶解速度を小さくすることで水和熱の発熱速度を緩やかにすることで温度ひび割れを抑制することができると考えられる。

以上のことから、本研究では、コンクリートのひび割れに対策する手法の発展に寄与するために、練混ぜ水が高濃度になる場合のコンクリートの圧縮強度、乾燥収縮、発熱特性などの諸特性について実験的に検討する。

2. 練混ぜ水として用いた高濃度 NaCl 水溶液がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響に関する実験

2.1 実験概要

本研究では、練混ぜ水に溶解させる溶質として NaCl を用いた。NaCl を用いたのは、溶解度が高く、取り扱いが容易であるためである。NaCl を用いることは、耐久性の観点では、コンクリート構造物に対して悪影響を与えるが、本研究の段階では、練混ぜ水が高濃度になった場合の諸特性の変化を把握することを優先する。

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圧縮強度に及ぼす影響を把握するために、練混ぜ水として水道水と種々の濃度の 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養生し、圧縮強度を測定する実験を行った。実験には $\phi 50 \times 100\text{mm}$ のモルタル供試体を用いた。モルタルの W/C は 50%とし、s/c は 3.59 とし、練混ぜ水として用いる NaCl 溶液の密度の違いを考慮するために、w/c (体積比) を 1.58 一定とした。モルタルは普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm^3)、山砂 (密度 2.63g/cm^3 , 吸水率 1.94%)、水道水 (密度 1.00g/cm^3)、5%NaCl 溶液 (密度 1.03g/cm^3)、10%NaCl 溶液 (密度 1.07g/cm^3)、15%NaCl 溶液 (密度

*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)

*2 木更津工業高等専門学校専攻科 環境建設工学専攻

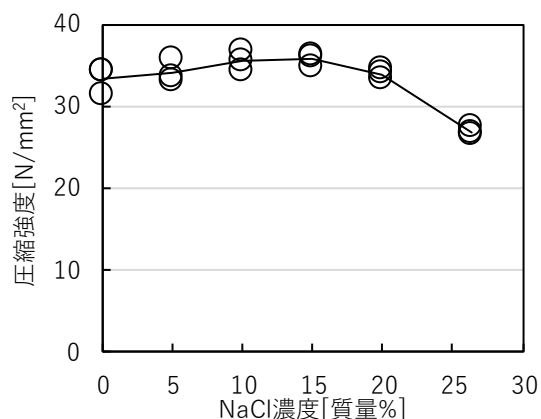


図-1 練混ぜ水の NaCl 濃度と 28 日圧縮強度の関係

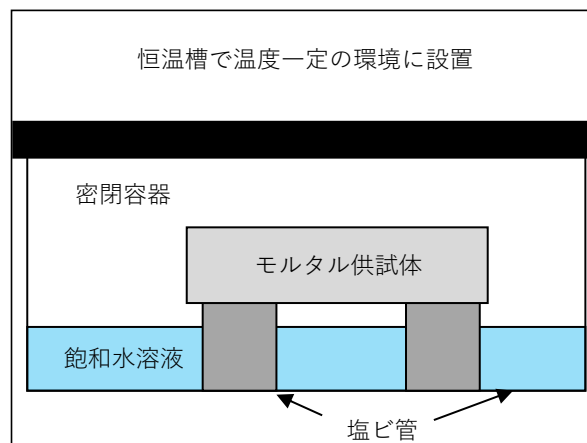


図-2 飽和塩法による供試体の暴露例

1.10g/cm³), 20%NaCl 溶液 (密度 1.14g/cm³), 飽和 NaCl 溶液 (密度 1.19g/cm³) を用いて作製した。骨材は表乾状態にしたものを用いた。NaCl 水溶液は水道水と純度 99.9%の NaCl 結晶を用いて作製した。

作製した供試体は、温度 20℃一定の恒温環境下で 28 日封かん養生した。圧縮強度試験は、練混ぜ水のそれぞれの濃度水準ごとに 3 本ずつを行った。

2.2 実験結果および考察

図-1 は、種々の練混ぜ水の NaCl 水溶液の濃度と圧縮強度の関係を示したものである。練混ぜ水の NaCl 濃度が 15%までは、濃度の増加に伴い圧縮強度が増加する。そして、NaCl 濃度が 20%からは圧縮強度が低下するが、練混ぜ水が水道水のものと同程度である。しかし、NaCl 濃度が飽和すると圧縮強度は練混ぜ水が水道水のもの 8 割程度まで低下する。

練混ぜ水の NaCl 濃度が 15%までは NaCl 濃度の増加に伴い圧縮強度が増加し、NaCl 濃度が 20%からは圧縮強度が低下しつつある理由は定かではないが、塩化物は硬化促進剤⁴⁾であること、水溶液の濃度が高くなると相互拡散係数が低下する⁵⁾ことが関係していると考えられる。これにより、練混ぜ水の濃度が低い場合では、NaCl による硬化促進効果の影響が卓越することで 28 日強度が増加し、濃度が高い場合は練混ぜ水自体の物理化学的特性値の変化による影響が卓越することで 28 日強度が低下したと考えている。練混ぜ水の濃度が飽和になると圧縮強度が練混ぜ水が水道水のものより明確に低下する理由は定かではないが、NaCl の存在により C₃A の水和の際に強度寄与が小さいアルミナゲルが多く生成されることや、硬化過程において溶媒である水が水和反応により消費され、溶質である NaCl の結晶塩が析出することで膨張圧が生じ、微細なひび割れが発生し、それに伴い強度低下したためと考えている。

今回確認された練混ぜ水が高濃度になることで生じ

た強度の低下が、NaCl 特有のものでないとしたら、練混ぜ水に高濃度水溶液を用いる場合、硬化した際に自由水の濃度が過飽和になることを極力避けることが望ましいと考えられる。

3. 練混ぜ水として用いた高濃度 NaCl 水溶液がモルタルの乾燥および収縮に及ぼす影響に関する実験⁶⁾

3.1 実験概要

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を把握するために、練混ぜ水として水道水と飽和 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。自己乾燥の影響を小さくするために、モルタルの W/C は 55%とし、s/c は 4.22 とし、練混ぜ水として用いる飽和 NaCl 溶液の密度の違いを考慮するために、w/c (体積比) を 1.74 一定とした。モルタルは普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)、山砂 (密度 2.63g/cm³, 吸水率 1.94%)、水道水 (密度 1.00g/cm³)、飽和 NaCl 溶液 (密度 1.19g/cm³) を用いて作製した。

29 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℃、相対湿度 85% (KCl による飽和塩法)、59% (NaBr による飽和塩法)、33% (MgCl₂ による飽和塩法) の環境でそれぞれ 2 本ずつ 28 日乾燥させる。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。

3.2 実験結果および考察

図-3 は、各乾燥環境下の供試体質量の経時変化を示したものである。いずれの乾燥環境下でも練混ぜ水として飽和 NaCl 水溶液を用いた供試体の質量変化は小さくなり湿潤傾向を呈す。相対湿度 85%の環境下については、練混ぜ水として飽和 NaCl 水溶液を用いた供試体につい

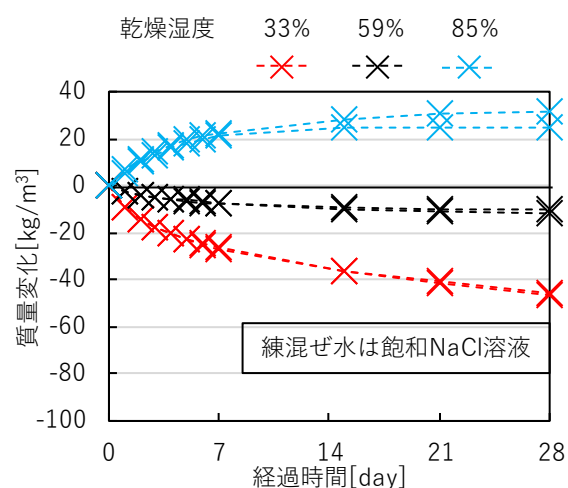
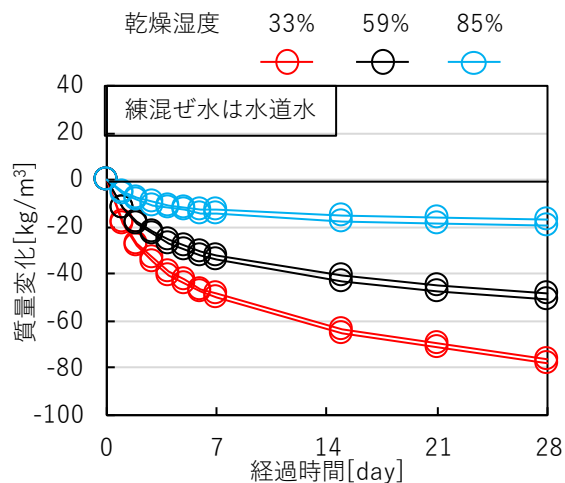


図-3 乾燥期間中の質量の経時変化

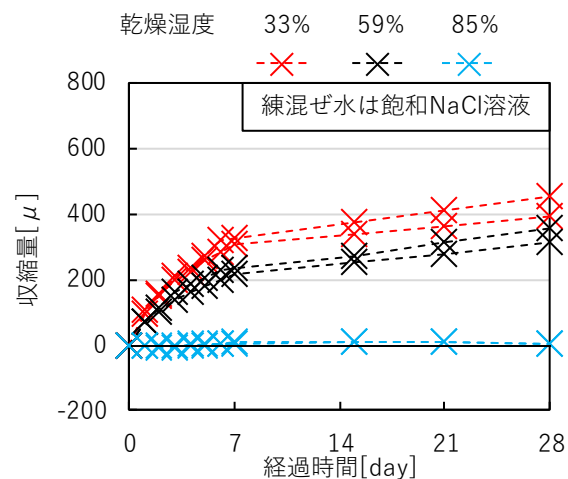
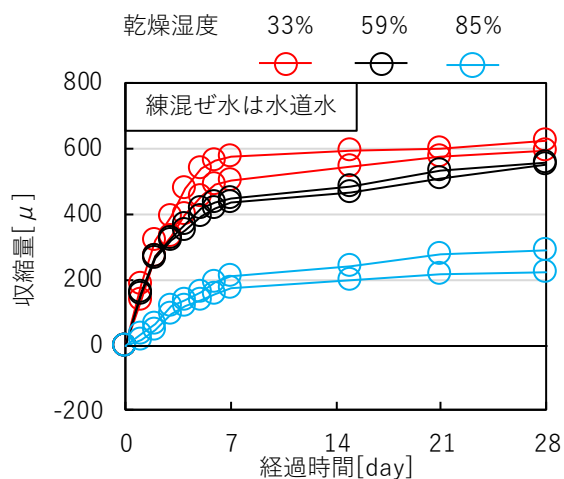


図-4 乾燥期間中の収縮量の経時変化

ては、乾燥せずに吸湿している。これは練混ぜ水として用いた飽和 NaCl 溶液の平衡湿度が暴露環境の相対湿度より低いことが関係していると考えられる。

図-4 は、各乾燥環境下の供試体の収縮量の経時変化を示したものである。いずれの乾燥環境下でも練混ぜ水として飽和 NaCl 水溶液を用いたものの収縮量は、練混ぜ水として水道水を用いたものの収縮量より小さくなり、吸湿しているものについては収縮していない。この結果は、練混ぜ水として用いる高濃度水溶液の平衡湿度を把握することで、コンクリート中の水分の逸散を制御し、それに伴いコンクリートの乾燥収縮ひびわれを制御できることを示している。

図-3、図-4 より、質量変化を比較すると、乾燥湿度 85%で練混ぜ水が水道水の場合は乾燥湿度 59%で練混ぜ水が飽和 NaCl 水溶液のものと同程度で、乾燥湿度 59%で練混ぜ水が水道水の場合は乾燥湿度 33%で練混ぜ水が飽和 NaCl 水溶液のものと同程度である。しかし、収縮量を比較すると、乾燥湿度 85%で練混ぜ水が水道水の場合は乾燥湿度 59%で練混ぜ水が飽和 NaCl 水溶液のものと

より小さくなり、乾燥湿度 59%で練混ぜ水が水道水の場合は乾燥湿度 33%で練混ぜ水が飽和 NaCl 水溶液のものより大きくなる。すなわち、質量変化が少ないと、練混ぜ水が飽和 NaCl 水溶液になると質量変化あたりの収縮量が大きくなり、質量変化が多くなると逆に考えられる。その理由としては定かではないが、NaCl の存在による C_3A の水和促進や生成されるアルミナゲルにより自己収縮が大きくなること、硬化過程において溶媒である水が水和反応により消費され、溶質である NaCl の結晶塩が析出することで膨張圧が生じていることが関係していると考えている。

そのため、練混ぜ水として高濃度水溶液を用いる場合、練混ぜ水に溶解させる溶質については、平衡湿度の低下だけでなく、水和反応に及ぼす影響も考慮して選定することが望ましいといえる。そして、練混ぜ水の濃度については、飽和濃度になると圧縮強度が明確に低下するため、硬化後の自由水の濃度が飽和濃度に近い値に調整したものをを用いることが望ましいといえる。

表-1 簡易断熱温度上昇試験に用いたコンクリートの配合

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]
		NaCl水溶液 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
0	1.00	174	400	776	1090	12
6.5	1.04	181				
13	1.09	190				
20	1.14	198				
26.4	1.19	207				

W：水道水+NaCl 結晶（純度 99.9%），C：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³），S：山砂（密度 2.66g/cm³，吸水率 1.94%），G：石灰岩（密度 2.68g/cm³，吸水率 0.52%），Ad：AE 剤

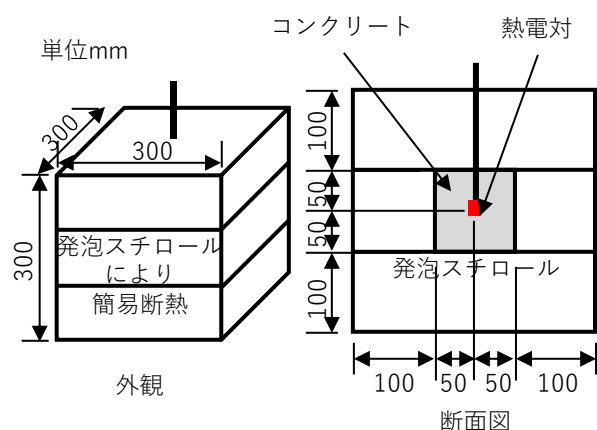


図-5 簡易断熱容器概要

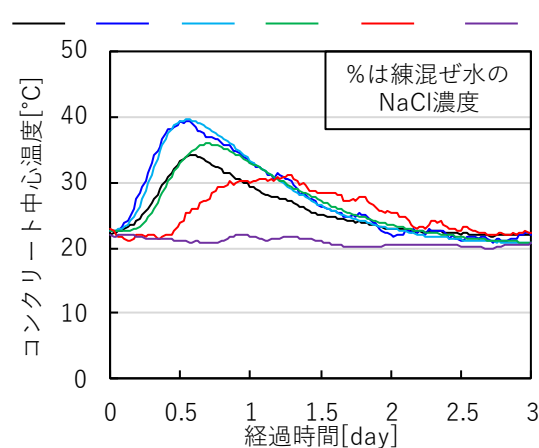


図-6 コンクリート中心温度の経時変化

4. 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発熱特性に及ぼす影響に関する実験

4.1 実験概要

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発熱特性に及ぼす影響を把握するために、練混ぜ水として水道水と種々の NaCl 水溶液を用いてコンクリートの簡易的な断熱温度上昇試験を行った。

実験に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。練混ぜ水として用いる NaCl 溶液の密度の違いを考慮するために w/c（体積比）を 1.37 一定とした。

コンクリートを練混ぜ後、図-5 に示す発泡スチロールで簡易断熱した容器にコンクリートを打込み、コンクリートの中心温度および外気温を測定した。温度の測定には T 熱電対を用い、測定間隔は 30 分とした。

4.2 実験結果および考察

図-6 は簡易断熱容器中の種々の練混ぜ水を用いたコンクリートの中心温度と外気温の経時変化を示したものである。温度上昇のピークは、練混ぜ水の濃度が NaCl 溶液の濃度が 13% までは濃度の増加に伴い大きくなるが、それ以降は濃度の増加に伴い小さくなり、26.4% になると水道水のものより小さくなる。温度上昇の傾きについ

ても、練混ぜ水の濃度が NaCl 水溶液の濃度が 13% までは濃度の増加に伴い大きくなるが、それ以降は濃度の増加に伴い小さくなり、濃度が 26.4% になると水道水のものより小さくなる。温度上昇の開始時間については、NaCl 水溶液の濃度が 6.5% までは濃度の増加に伴い速くなるが、それ以降は濃度の増加に伴い遅くなり、濃度が 20% 以上になると水道水のものより遅くなる。この結果は、練混ぜ水の濃度を高濃度にする事で水和反応を遅延することができる可能性を示している。

練混ぜ水の濃度が高濃度になると水和反応を遅延させる理由としては、水溶液の濃度が高くなると相互拡散係数が低下し⁵⁾、それに伴い溶解速度が低下することが関係していると考えられる。一般的に NaCl のような塩化物は陰イオンの存在による相互拡散による Ca²⁺ と OH⁻ の溶出が促進され、エーライトの第 2 次水和物の生成が促進するといわれている⁴⁾。しかし、練混ぜ水の濃度が高濃度になると、相互拡散係数が低下し、Ca²⁺ と OH⁻ の溶出が抑制され、エーライトの第 2 次水和物の生成が抑制されることで、温度上昇の開始時間が遅延し、温度上昇のピークが小さくなったと考えている。

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断熱温度上昇特性に及ぼす影響の検討

5.1 計算概要

本章では、練混ぜ水として用いる高濃度水溶液がコンクリートの断熱温度上昇特性に及ぼす影響を、式(1)に示す熱伝導方程式、式(2)に示すコンクリートの断熱温度上昇特性 η 、式(3)に示す境界条件を用いて4章で述べたコンクリート中心の温度の実験結果から逆算することで検討する。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho c \frac{\partial Q(t)}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 T : コンクリートの温度[°C], ρ : 密度[kg/m³], c : 比熱[kJ/kg・°C], λ : 熱伝導率[W/m・°C]である。

発熱項である断熱温度上昇特性は式(2)で表現する。

$$Q(t) = Q_{\infty} \left(1 - e^{-r(t-t_0)^s} \right) \quad (2)$$

ここに、 $Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量[°C], Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量[°C], r : 温度上昇速度に関する定数[/day], t_0 : 温度上昇開始の原点[day], s : 温度上昇速度に関するパラメータ[無次元] (低熱ポルトランドセメント以外は $s=1$) である。

境界条件式は式(3)で表現する。

$$q = \eta(T_s - T_{ext}) \quad (3)$$

ここに、 q : コンクリート表面における熱流束[W/m²], η : 発泡スチロールも含めた熱伝達率[W/m²・°C], T_s : コンクリート表面温度[°C], T_{ext} : 外気温[°C]である。

濃度 0%のものの Q_{∞} , r について既往の文献 η に示すセメント量および打込み温度より推定できる値を用いた。熱伝達係数 η については、濃度 0%のコンクリート中心温度の実験値と計算値が概ね一致するように設定した。濃度 0%以外の Q_{∞} , r , t_0 は、コンクリート中心温度の実験値と計算値が概ね一致するように同定した。コンクリートの中心温度の計算値は3次元差分法により求めた。計算に用いた入力値を表-2に示す。メッシュサイズは10×10×10mmで時間差分は3.6sとした。

5.2 同定された断熱温度上昇特性に関する検討

図-7は図-6のコンクリート中心温度の実験値と同定した Q_{∞} , r , t_0 を用いて得た計算値を示している。温度上昇の過程においては、計算値は実験値より大きい、温度が下降する過程においては、計算値は実験値と概ね一致していることが確認できる。

図-8は横軸に練混ぜ水として用いたNaCl水溶液の濃度縦軸に逆算より同定された Q_{∞} を示している。断熱温度上昇量 Q_{∞} は、濃度13%までは濃度の増加に伴い大きくなるが、それ以降は濃度の増加に伴い小さくなり、26.4%になると水道水のものより小さくなる。図-9は横軸に練

表-2 逆計算入力値

練混ぜ水のNaCl濃度	0	6.5	13	20	26.4
ρ [kg/m ³]	2440	2447	2456	2464	2473
c [kJ/kg・°C]	1.24	1.24	1.23	1.23	1.23
λ [W/m・°C]	2.6				
η [W/m ² ・°C]	2.8				
T_{ext} [°C]	20.7				

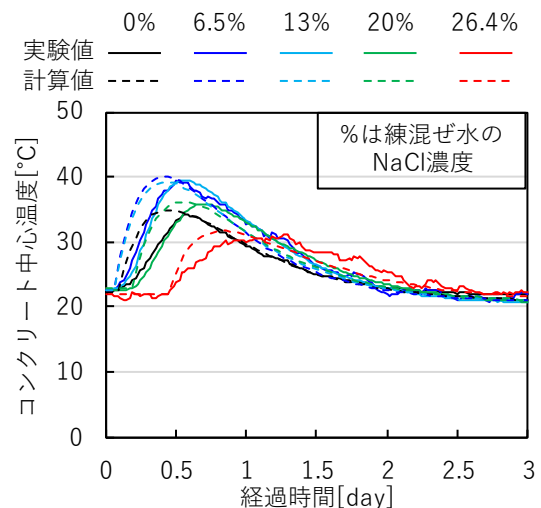


図-7 図-6の再現計算

混ぜ水として用いたNaCl水溶液の濃度縦軸に逆算より同定された r を示している。温度上昇速度に関する定数 r は6.5%までは濃度の増加に伴い大きくなるが、それ以降は濃度の増加に伴い小さくなり、濃度が26.4%になると水道水のものより小さくなる。図-10は横軸に練混ぜ水として用いたNaCl水溶液の濃度縦軸に逆算より同定された t_0 を示している。温度上昇開始の原点(遅延時間) t_0 は、濃度が6.5%までは濃度の増加に伴い小さくなるが、それ以降は濃度の増加に伴い大きくなり、濃度が20%以上になると水道水のものよりはるかに大きくなる。これらの結果より、練混ぜ水が高濃度水溶液になることで生じる水和の抑制具合は、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} 、温度上昇速度に関する定数 r 、温度上昇開始の原点(遅延時間) t_0 の順番で大きくなるといえる。この水和の抑制メカニズムが練混ぜ水が高濃度水溶液に起因するものであるとしたら、練混ぜ水に溶解させる溶質の種類を適切に選定することで、コンクリートの乾燥収縮の制御のみならず温度ひび割れを制御できる可能性を示唆している。

今後は、今回確認された練混ぜ水が高濃度になることで生じた水和の抑制がNaCl特有のものかどうかを把握することと、高濃度になることで生じる水和の抑制の割合が練混ぜ水に溶解させる溶質の種類およびその濃度によりどのように変化するかを体系的に明らかにすることが課題である。

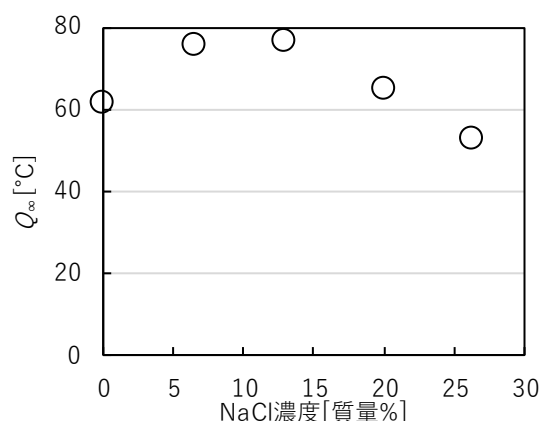


図-8 練混ぜ水の NaCl 濃度と Q_{∞} の関係

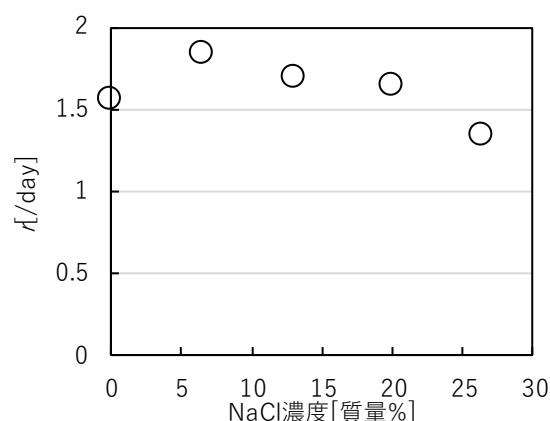


図-9 練混ぜ水の NaCl 濃度と r の関係

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 練混ぜ水として高濃度な NaCl 水溶液を用いた場合、モルタルの 28 日圧縮強度は、濃度が 15%までは、濃度の増加に伴い増加し、濃度が 20%からは濃度の増加に伴い低下するが、練混ぜ水が水道水のものと同程度であることがわかった。しかし、濃度が飽和濃度になると圧縮強度は練混ぜ水が水道水のものの 8 割程度まで低下することがわかった。
- 2) 練混ぜ水として高濃度な NaCl 水溶液を用いた場合、モルタルの乾燥を抑制し、それに伴い乾燥収縮量は小さくなる。練混ぜ水の平衡湿度が外気の湿度より低い場合は乾燥せず吸湿し、乾燥収縮が発生しない。すなわち、コンクリート中の自由水の平衡湿度を適切に把握することでコンクリートの乾燥を制御し、それに伴い乾燥収縮を制御することができるとわかった。
- 3) 練混ぜ水として高濃度な NaCl 水溶液を用いた場合、コンクリートの終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は濃度 13%までは濃度の増加に伴い大きくなるが、それ以降は濃度の増加に伴い小さくなり、26.4%になると水道水のものより小さくなる。コンクリートの温度上昇速度に関する定数 r は 6.5%までは濃度の増加に伴い大きくなるが、それ以降は濃度の増加に伴い小さくなり、濃度が 26.4%になると水道水のものより小さくなる。コンクリートの温度上昇開始の原点 t_0 は濃度が 6.5%までは濃度の増加に伴い小さくなるが、それ以降は濃度の増加に伴い大きく、濃度が 20%以上になると水道水のものより大きくなる。すなわち、練混ぜ水が高濃度水溶液になることで生じる水和の抑制度合いは、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} 、温度上昇速度に関する定数 r 、温度上昇開始の原点(遅延時間) t_0 の順番で大きくなることがわかった。

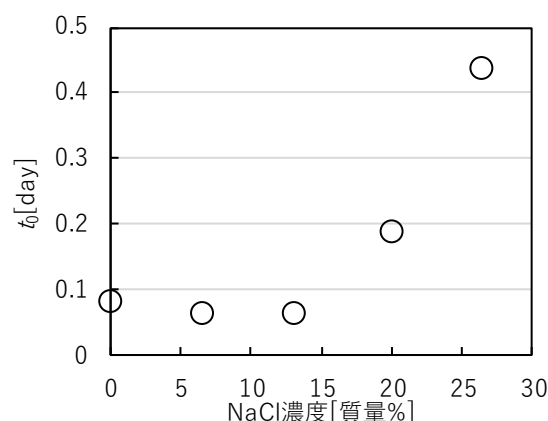


図-10 練混ぜ水の NaCl 濃度と t_0 の関係

参考文献

- 1) 阪田憲次, 浜田利彦, 岩城圭介: 尿素によるコンクリートの水和熱低減効果に関する研究, セメント技術年報, 42, pp.403-406, 1988.
- 2) 河井徹, 阪田憲次: 尿素を用いたコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.639-644, 2007.
- 3) 田中博一, 河井徹, 野田宏昭, 綾野克紀: 尿素を用いた低収縮コンクリートの実構造物への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.491-496, 2011.
- 4) 日本材料学会コンクリート混和材料部門委員会: コンクリート混和材料ハンドブック, 社団法人日本材料学会, pp.69-77, 2004.
- 5) 山本修一: 物質移動性としての拡散係数と水分吸脱着(乾燥), 日本食品工学会誌, Vol.11, No.2, pp.73-83, 2010.
- 6) 原田健二: 練混ぜ水として高濃度水溶液を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する検討, 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.22, pp.87-90, 2022.
- 7) 土木学会コンクリート委員会ほか: 2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 社団法人土木学会, pp.325-336, 2017.