

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14012

研究課題名(和文)塩分がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響の機構解明と水分移動モデルへの導入

研究課題名(英文)Clarification of influences of chloride on drying and wetting characteristics of concrete and its mathematical modelling

研究代表者

下村 匠 (Shimomura, Takumi)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：40242002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート中の液状水中に存在する塩分が、コンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響を実験により検討した。コンクリートの細孔中の液状水に塩分が存在することで、平衡液状水量が増大すると、コンクリート内部の水分移動速度が低下すること、それらの結果コンクリートは湿潤傾向となることを明らかにした。塩分が水分の移動に及ぼす影響を考慮したコンクリート中の水分・塩分連成解析法を構築した。塩分の存在による平衡液状水量の増大は飽和水蒸気圧降下と液状水の物性の変化を考慮することで表現でき、コンクリート中の水分移動速度の低下は液状水の移動速度を細孔中の液状水の塩分濃度に応じて低減させることで表現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Effect of chloride in liquid water on drying and wetting behavior of concrete was experimentally investigated. Experimental result showed that equilibrated water content increases and moisture transfer rate in concrete decreases with increasing of chloride content in concrete. Consequently, concrete tends to wet by the existence of chloride. Analytical method for coupled transport of water and chloride in concrete which effect of chloride on moisture transport is taken into account was proposed. Increasing of equilibrated water content due to chloride can be expressed by considering decreasing of saturated vapor pressure and change in physical property of liquid water. Decreasing of moisture transfer rate in concrete due to chloride can be expressed by considering decreasing in transfer rate of liquid water in accordance with chloride concentration.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 塩分 水分移動 連成解析 乾燥 吸湿 吸水

1. 研究開始当初の背景

構造物の劣化促進物質である塩分のコンクリート中における移動は実用的な場面では簡便で明快な拡散方程式により表されることが多い。コンクリート中における塩分の移動をより精密に評価しなければならない場面では、塩分が塩化物イオン、ナトリウムなどのアルカリイオンとして水に溶けた状態で移動することに基づき、水分と塩分の連成移動解析手法が用いられることがある。既往の水分・塩分連成移動解析の多くでは、コンクリート中の液状水のバルク移動に伴う塩分の移動や液状水中の塩分濃度の変化を表現することで水分の移動が塩分の移動に及ぼす影響が考慮されているが、塩分が水分の移動に及ぼす影響を考慮しているものはあまりない。

塩分がコンクリートやモルタルの含水状態に及ぼす影響を検討した既往の研究によると、コンクリート中に塩分が存在することで、コンクリートが湿潤傾向になることが明らかにされている。

塩分などの溶質が溶け込んだ水溶液の性質として、蒸気圧降下がある。溶質が存在すると水溶液は高い水蒸気分圧を示すことはできない。実際のコンクリート中の水分はセメント水和物由来のカルシウムイオンなどを含んだ水溶液であるが、希薄であるため、一般の環境下でのコンクリートの乾湿挙動を論じるうえでは、溶質を含まない水と物理化学的性質が同等とみなして問題は生じなかったものと思われる。しかし、海水粒子が飛来する海岸付近や凍結防止剤が散布される構造物では、乾湿を繰り返すことで塩分の濃縮がおこり、コンクリート表面近傍において著しく高濃度になることがある。

2. 研究の目的

コンクリート中の液状水の塩分濃度の違いがコンクリートの乾湿挙動(乾燥, 吸湿, 吸水)に及ぼす影響を実験的に検討すること、水分平衡特性、水分移動特性の観点から、その影響メカニズムを明らかにし、水分・塩分双方向の影響を考慮したコンクリート中の水分・塩分連成移動解析法を構築すること、を目的とした。

3. 研究の方法

塩分がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響に関する実験事実を把握するために以下の実験を行う。

薄いモルタル供試体の空隙中を濃度の異なる NaCl 溶液で飽和させ、温度、湿度が一定の環境下で質量が平衡に至るまで、乾燥ならびに吸湿をさせる。塩分が平衡含水率、平衡状態に至る速度を実測する。

厚さが十分にあるモルタル供試体の空隙中を濃度の異なる NaCl 溶液で飽和させ、供試体を乾燥ならびに吸湿させ供試体内部の水分移動速度を検討する。

吸水挙動に及ぼす塩分の影響を検討するために、モルタル供試体を濃度の異なる NaCl 溶液に接触させ吸水させる。また、モルタル供試体を濃度の異なる NaCl 溶液で飽和させた後に絶乾状態まで乾燥させ、その後吸水させる。

以上の実験より得られた結果に基づき、コンクリートの乾湿挙動に及ぼす塩分の影響メカニズムを考察し、著者らのコンクリート中の水分移動モデルに塩分の影響を導入する。水分平衡特性、水分移動特性(不飽和状態における水蒸気移動、液状水移動、および表面からの吸水)の観点から検討する。

作成した塩分の影響を考慮したコンクリート中の水分移動モデルの検証を行う。実験の再現解析および感度解析により行う。

4. 研究成果

実験的検討の結果、以下が明らかとなった。種々の濃度の NaCl 溶液を用いて飽和させ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図-1 に示す。モルタル細孔中の液状水の塩分濃度が高いほど同一相対湿度環境下における平衡相対液状水量は高い。塩分が溶解することにより、溶液の呈す飽和水蒸気圧が低下するためであると考えられる。

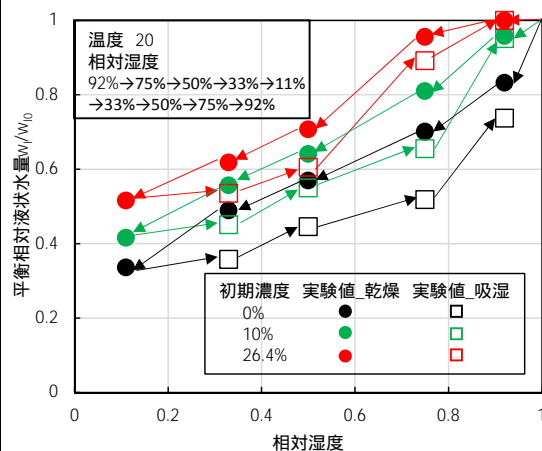


図-1 塩分がモルタルの水分平衡特性に及ぼす影響

図-2 は温度 20℃, 相対湿度 50%での乾燥期間と温度 20℃, 相対湿度 93%での吸湿期間の供試体の乾湿挙動を、乾燥開始を飽水状態と仮定して求めた相対液状水量の経時変化で表したものである。塩分が存在すると乾燥時、吸湿時ともに平衡する相対液状水量は高くなり、塩分濃度が高いほどその程度は大きい。これらの傾向は図-1 の水分平衡特性と一致する。乾燥速度(乾燥時に平衡に至る速度)は、塩分濃度が異なってもほとんど差がない。一方、吸湿速度(吸湿時に平衡に至る速度)は乾燥時と比べると塩分濃度の影響を受け、塩分濃度が高いほど吸湿速度が大きくなっている。この理由はコンクリートの水分平衡特性の乾湿の経路依存性(図-1)とコンクリート中の水分拡散係数の含水率依存性によ

と考えている．一般に含水率が高い範囲に

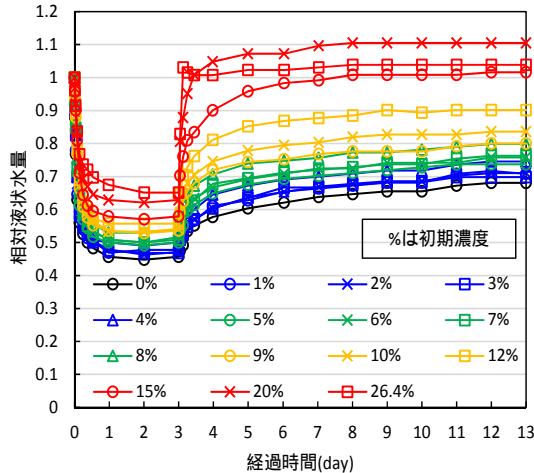


図-2 乾湿期間中の相対液状水量の経時変化

においては，含水率の変化とともに水分拡散係数が急激に変化するが，含水率が 70～80%程度以下になれば，拡散係数はほぼ一定値になることが知られている．吸湿過程では乾燥過程よりも塩分濃度の違いによる含水率の差が大きくなるので吸湿速度の差が大きくなったと考えられる．

コンクリート内部における水分の移動速度については，塩分が存在することで供試体の相対液状水量の減少速度が低下し，その程度は塩分濃度が高いほど顕著である結果となった．薄いモルタル供試体を用いた実験では，塩分が存在しても乾燥速度はほとんど差がなかったため，この結果は，塩分が存在することでコンクリート内部における水分移動速度が低下することを示していると考えられる．コンクリート内部における水分移動速度が低下する理由は定かではないが，液状水中に溶解している塩化物イオンやナトリウムイオンの水和イオンは水分子よりはるかに大きいと考察した．

液状水中に塩分が溶解しているとコンクリート中への吸水量は増大することが明らかとなった．また，あらかじめコンクリート中に存在する結晶塩が再溶解することによっても同様にコンクリートの吸水量が増大することが明らかとなった．これらはコンクリート内部と外部の塩分の濃度差に起因した浸透圧により，液状水が吸引されることによるものと推察した．

実験により得られた知見に基づき，コンクリート中の水分移動モデルへの塩分の影響の導入を行った．塩分の存在による飽和水蒸気圧の低下，液状水の密度，表面張力，動粘性係数の物性の変化，ならびに液状水移動速度の低下を考慮することにより，図-3のように内部の水分分布を含めてコンクリートの乾燥，吸湿挙動に及ぼす塩分濃度の影響を再現することができることが明らかとなった．

ただし，吸水現象における塩分の影響のモデル化については未完である．

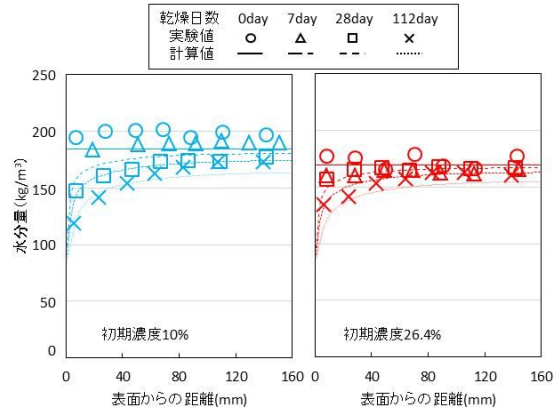


図-3 塩分を含むモルタル供試体の乾燥

感度解析の結果，コンクリート中の液状水の塩分濃度が海水程度（3%程度）である場合には，塩分がコンクリート中の水分移動に及ぼす影響を考慮しない計算方法によってもコンクリートの乾湿挙動ならびにコンクリート中への塩分浸透を評価できるが，塩分濃度が高い（10%程度以上）場合には，コンクリートの乾湿挙動ならびにコンクリート中への塩分浸透をより正確に把握するためには塩分がコンクリート中の水分移動に及ぼす影響を考慮するのがよいとの結論を得た．後者には例えば，乾湿繰返しによってコンクリート表面近傍において塩分が濃縮される場合や，凍結防止剤が溶けた高濃度の塩水がコンクリートに作用する場合は該当する．

<引用文献>

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.427-439，2016.11

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

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.427-439，2016.11

原田健二，佐藤駿介，下村 匠：塩分がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1，pp745-750，2015.7

〔学会発表〕(計1件)

原田健二，下村 匠：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，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，V-053，pp105-106，2015.9

6．研究組織

(1)研究代表者

下村 匠 (Takumi Shimomura)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：40242002

(4)研究協力者

原田健二 (Kenji Harada)

長岡技術科学大学・工学研究科・大学院生