

論文 潮解がコンクリート内部への水分と塩分の浸透に及ぼす影響に関する検討

原田 健二*1

要旨：厚さが異なるモルタル表面に結晶塩を散布し、それを高湿度環境で暴露を行い、潮解現象がコンクリート中の水分および塩分の浸透に及ぼす影響を検討した。モルタルへ浸透した水分量および全塩化物イオン量の測定結果より、表面近傍への水分の伝達は、暴露 1 日のように潮解による凝縮水が少ない場合は水蒸気の吸湿の影響が大きく、凝縮水が多い場合では凝縮水の浸透の影響が大きく、水分の浸透する深さは、表面に存在する凝縮水の影響が大きく、表面に凝縮水が存在しなくなると、水蒸気の吸湿のみと同程度になることが明らかになった。塩分の移動は、凝縮水の浸透に伴い生じ、その影響が大きいことが明らかになった。

キーワード：潮解、水分、塩分、結晶塩、蒸気圧降下

1. はじめに

コンクリートの含水状態は、コンクリート中における塩化物イオンなどの劣化促進物質の移動に影響を及ぼす。そのため、コンクリート中の塩分の移動を精密に予測する解析法として、水分と塩分の連成移動解析手法の構築が進められてきた。既往の研究^{1) 2) 3)}の多くは、コンクリート中の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ほとんどである。塩分の存在がコンクリート中の水分の移動に及ぼす影響を考慮している既往の研究⁴⁾もあるが、塩分は液状水中に溶解しているものとして検討しており、結晶塩として存在している塩分がコンクリート中の水分移動および塩分の移動に及ぼす影響を考慮したものはほとんどない。

結晶塩の性質としては、潮解がある。潮解とは、塩の飽和水溶液が呈す飽和水蒸気圧が大気の水蒸気分圧より低いときに、大気中の水蒸気が結晶塩に凝縮し続ける現象である。そのため、コンクリート表面に結晶塩が存在する場合、潮解により表面に凝縮水が発生し、それに伴い高濃度な塩を含む水分が浸透する可能性がある。一般の環境下では、コンクリート中の水分に存在する塩分は希薄であるため、コンクリート表面に結晶塩が析出することはあまりなく、結晶塩がおよぼす影響を考慮しなくても問題は生じなかったものと思われる。しかし、凍結防止剤が散布される構造物や海塩粒子が飛来する海岸付近のような環境下では、乾湿が繰り返すことで塩分が濃縮し、表面に塩分が析出するようなことが起こりうると考えられる。

以上のことから、本研究では、コンクリート表面に存在する結晶塩の存在がコンクリート中への水分および塩分の浸透に及ぼす影響を実験的に検討する。

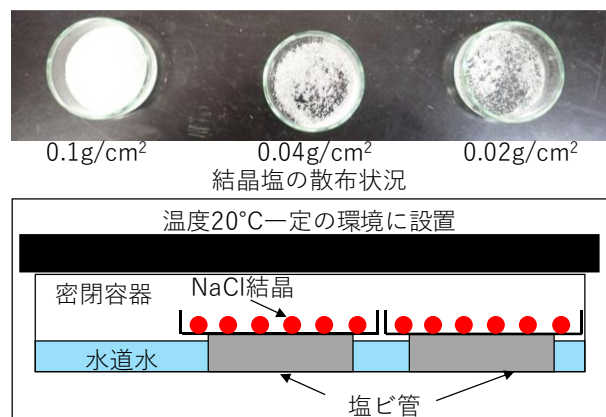


図-1 暴露方法概要

2. 結晶塩の潮解が水分の凝縮速度に及ぼす影響に関する実験的検討

2.1 実験概要

結晶塩の潮解が水分の凝縮速度に及ぼす影響を把握するために図-1 に示すように、内径 58mm、深さ 10mm のシャーレに純度 99.9%、粒径 0.2～0.5mm 程度の NaCl 結晶を 0.02, 0.04, 0.1g/cm² 散布し、温度 20℃、相対湿度 100%の密閉容器中で暴露し、質量の経時変化を測定した。

質量変化は潮解による結晶塩への水蒸気の凝縮によるものと仮定した。

2.2 実験結果および考察

シャーレ内の質量変化を図-2、シャーレ内の NaCl の質量濃度の経時変化を図-3 に示す。

結晶塩の潮解による水分の凝縮速度は NaCl 水溶液が示す飽和水蒸気圧とその時点における水蒸気分圧の差に比例すると仮定し、式(1)で表現した。

$$J = K(p_v - p'_{v0}) \quad (1)$$

*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 助教 (正会員)

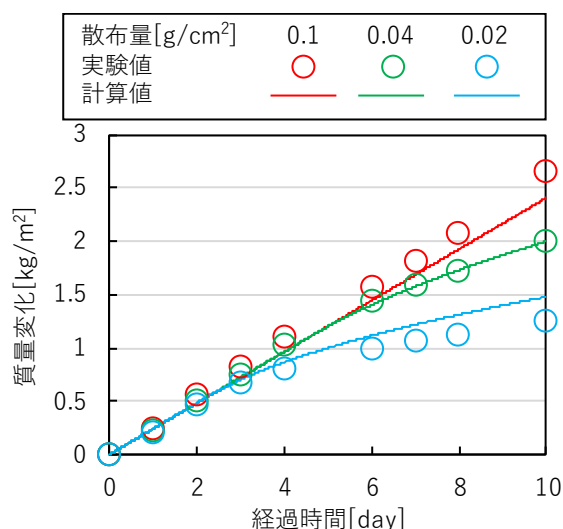


図-2 凝縮水の質量の経時変化

ここに、 J : 単位面積当たりの凝縮 (正の値) 速度 $[\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}]$, K : 風速の影響を含む実験係数 $[\text{s}/\text{m}]$, p_v : 雰囲気の水蒸気分圧 $[\text{Pa}]$, p'_{v0} : 飽和水蒸気圧 $[\text{Pa}]$ である。 p_v は密閉空間中の湿度を 100%と仮定し, 20°C の飽和水蒸気圧を用いた。 p'_{v0} は式(2)に示す既往の研究⁵⁾の NaCl 濃度と 20°C での飽和水蒸気圧の係数を用いた。 K 値は実験係数であり, 実験値と概ね一致するように $4.8 \times 10^{-8} [\text{s}/\text{m}]$ とした。

$$p'_{v0} = p_{v0} - 1.83 \times 10^{-4} p_{v0} C_{\text{NaCl}}^2 - 4.59 \times 10^{-3} p_{v0} C_{\text{NaCl}} \quad (2)$$

ここに、 C_{NaCl} : 溶液の塩分濃度 (NaCl) $[\text{質量}\%]$ (濃度が 26.4% (飽和濃度) 以上の場合は 26.4%として計算する), p_{v0} : 溶質を含まない水の飽和水蒸気圧 $[\text{Pa}]$, p'_{v0} : 塩分濃度 C_{NaCl} の溶液の飽和水蒸気圧 $[\text{Pa}]$ である。

図-2 の計算値は、 K 値を用いて式(1)より求めた凝縮速度に経過時間を乗じたものである。なお、凝縮に伴い凝縮水の濃度が時々刻々と変化することを考慮している。

図-2 より、シャーレ内の質量変化の実験値および計算値は、暴露 3 日までは結晶塩の散布量に関わらず、概ね同じであるが、結晶塩の散布量が少ないほど、質量変化が小さい。これは、図-3 に示すように、結晶塩の散布量が少ないものに関しては、暴露期間中の質量濃度が NaCl の飽和濃度である 26.4%以下になり、凝縮水が呈す飽和水蒸気圧の低下量が飽和水溶液より小さいことが関係していると考えられる。実験値と計算値を詳細に比較すると、0.04 の実験値は計算値とほぼ一致しているが、0.1 の実験値は計算値より大きく、逆に 0.04 の実験値は計算値よりより小さいことが確認できる。これは、図-1 に示すように、散布量によって散布面における結晶塩の表面積の違いが関係していると考えられる。これらのことから、潮解による水分の凝縮速度は、濃度が高いほど大きくなり、凝縮水が呈す飽和水蒸気圧とその時の雰囲気の水蒸

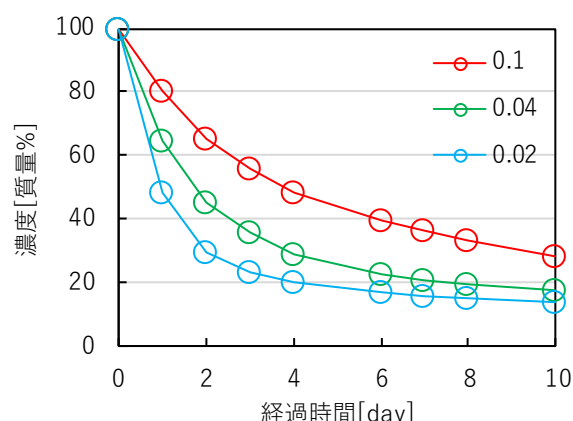


図-3 凝縮水の濃度の経時変化

表-1 供試体配合

W/C	s/c	単位量 (kg/m^3)		
		W	C	S
0.5	3.6	255	510	1530

W: 水道水, C: 普通ポルトランドセメント, S: 山砂

気分圧の差に比例するとして概ね表現できることがわかった。

3. 結晶塩の潮解がコンクリート表面近傍への水分と塩分の伝達に及ぼす影響に関する実験的検討

3.1 実験概要

結晶塩の潮解がコンクリート表面近傍への水分と塩分の伝達に及ぼす影響を検討するために、コンクリート表面を模擬した薄板モルタル供試体表面に結晶塩を散布し、温度、湿度が一定の環境下でそれら供試体を暴露した。

実験には $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}$ の薄板モルタル供試体を用いた。配合を表-1 に示す。詳細を以下に示す。

28 日封かん養生した供試体を 120°C の乾燥炉で 7 日間乾燥させた。乾燥させた供試体を $50 \times 50 \text{ mm}$ の 1 面以外を気密防水テープでシーリングし、表面に純度 99.9%以上の結晶塩を 0, 0.02, 0.04, $0.1 \text{ g}/\text{cm}^2$ 散布し、図-1 に示すような密閉容器中に設置し、温度 20°C 、相対湿度 100%の環境で暴露し、質量の経時変化を測定した。暴露開始後は、表面に結晶塩を散布した供試体については、所定の暴露日数 (1, 2, 4, 8 日) が経過した後に表面に存在する結晶塩および凝縮水をスクレーパーで除去し、それを 120°C で 24 時間当たりの質量変化が 0.1 g 以下になるまで炉乾燥をし、蒸発質量を測定することで供試体中の水分量を求めた。水溶液のそして、供試体を粉砕し、NDIS 3433: 2017「硬化コンクリートの塩化物イオン量の簡易試験方法」に準じて全塩化物イオン量を測定した。表面に結晶塩を散布していない供試体については、供試体の質量変化を測定することで供試体中の水分量を求めた。

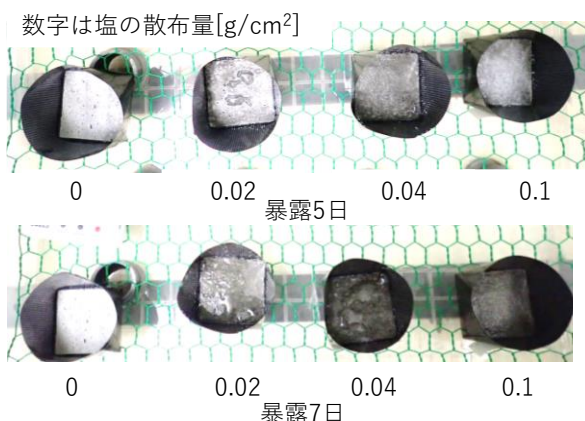


図-4 潮解による凝縮水の発生の様子

供試体を乾燥させる際に、120℃で乾燥させた理由としては、飽和 NaCl 溶液の沸点が 109℃であるため、一般的な 105℃炉乾燥では、絶乾状態に出来ないためである。従来の炉乾燥より、高温にすることで一部のセメント水和物の分解し、水分量や塩分量の測定結果に影響を及ぼす可能性があるが、今回の実験では、ただちに乾燥させることを優先した。

供試体の質量変化は結晶塩の潮解による水蒸気の凝縮とモルタルへの吸湿により生じているものと仮定した。

3.2 実験結果および考察

図-4 に実験期間中の供試体表面の様子を示す。表面に結晶塩を散布したものは供試体表面に凝縮水が発生しており、結晶塩の散布量が少ないものについては結晶塩が全て溶解していることが確認できる。

図-5 に供試体表面に存在する結晶塩および凝縮水を含む質量の経時変化を示す。暴露 1 日時点では、結晶塩の有無によらず、質量変化は概ね同じである。しかし、暴露 2 日以降については結晶塩の存在により、質量変化が明らかに大きくなる。この理由としては、潮解により生じる凝縮水の凝縮速度がモルタル中への水分浸透速度より大きくなり表面に凝縮水が増え続けるからである。結晶塩の散布量による差は、0.1 と 0.04 はほぼないが、0.02 のものについては、暴露 4 日以降の質量変化が小さくなり、2 章で示した結果より散布量の違いによる差が小さくなる。これは、シャーレの上での暴露と異なり、凝縮水が逐次モルタル供試体中に浸透することで、表面に存在する凝縮水の濃度の低下が緩やかになることが関係していると考えられる。図-4 で確認できるように表面に存在する結晶塩が潮解により全て溶解し、表面に存在している凝縮水の濃度が飽和濃度以下になっていることが関係していると考えられる。

図-6 に供試体中の水分量の経時変化を示す。暴露 1 日時点では、供試体中の水分量の変化は結晶塩の有無によらず、概ね同じである。一方、暴露 2 日以降について

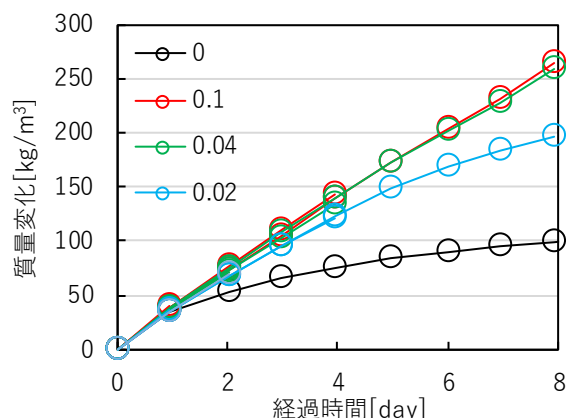


図-5 表面の凝縮水も含む質量の経時変化

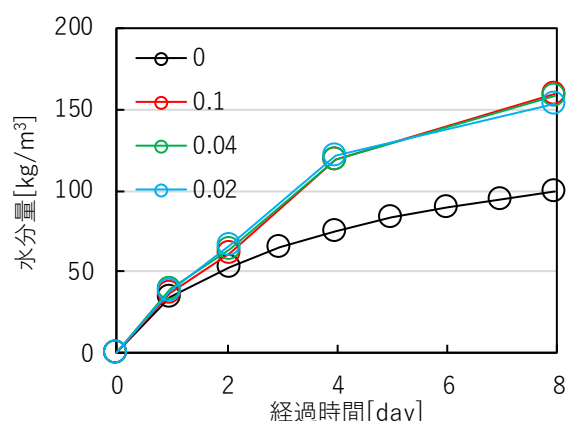


図-6 供試体中の水分量の経時変化

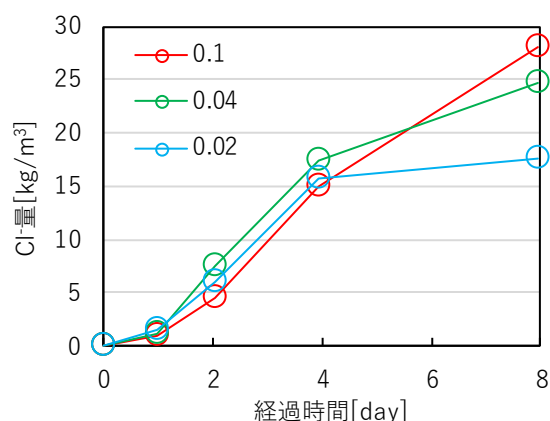


図-7 供試体中の Cl⁻量の経時変化

は、結晶塩が存在することで水分量が大きく変化し、結晶塩の散布量によらず水分量が同程度である。この理由としては、暴露初期では、結晶塩の潮解により生じる凝縮水の量が少ないことが関係していると考えられる。そのため、結晶塩が表面に存在する場合、潮解による凝縮水が表面において少ない状況では、コンクリート表面近傍への水分の伝達は、凝縮水で濡れていない面における水蒸気の吸湿による影響が大きく、潮解による凝縮水が表面で多くなったとき、その浸透による影響が大きくなるものと考えられる。

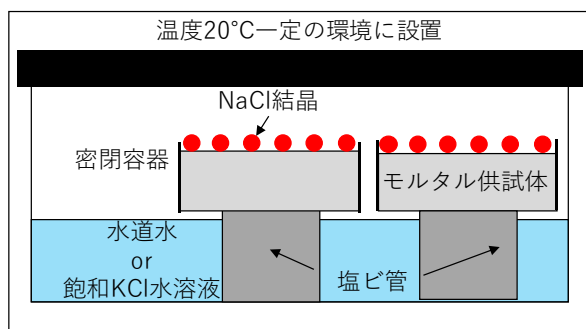


図-8 暴露方法概要 2

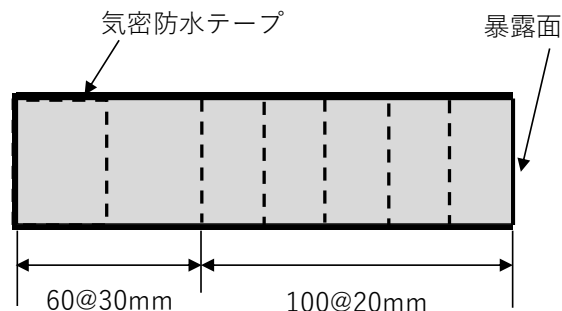


図-9 供試体切断位置

以上のことから、潮解によるコンクリート表面近傍への水分の浸透は、凝縮水により濡れていない面における水蒸気の移動と凝縮水により濡れている面における液状水の移動両方の影響があるといえる。

図-7 に結晶塩を散布した供試体の Cl⁻量の経時変化を示す。暴露 4 日時点までは、暴露 1 日までの塩分浸透量が少なく、それ以降に浸透量が急激に増加するという変化が表面に散布した結晶塩の散布量に関わらず概ね一致している。一方、暴露 8 日時点の塩分浸透量は結晶塩の散布量が多いほど塩分の浸透量が多くなる。暴露 1 日までの塩分浸透量が少なく、それ以降の浸透量が急増した理由としては、暴露初期では潮解による凝縮水が少なく、時間の経過に伴い潮解による凝縮水が供試体表面を覆っていくことが関係していると考えられる。暴露 8 日時点での塩分浸透量に差が出た理由としては、図-4 に示すように、暴露 4 日から暴露 8 日の間で、結晶塩の散布量が 0.1g/cm² 以外の供試体では、表面に散布した結晶塩が凝縮水により全て溶解し、凝縮水の塩分濃度が飽和濃度以下になったことが関係していると考えられる。

以上のことから、潮解によるコンクリート表面近傍への塩分の浸透は、潮解により生じる塩分を含む凝縮水の浸透の影響が非常に大きいといえる。また、塩分の浸透量を適切に予測する際には、表面に存在する結晶塩の量および凝縮水の濃度を把握する必要があるといえる。

4. 結晶塩の潮解がコンクリート内部への水分と塩分の移動に及ぼす影響に関する実験的検討

4.1 実験概要

結晶塩の潮解がコンクリート内部への水分と塩分の移動に及ぼす影響を検討するために、モルタル供試体に結晶塩を散布し、温度、湿度が一定の環境下でそれら供試体を暴露した。

実験には 40×40×160mm の角柱モルタル供試体を用いた。配合は前章の実験で用いたものと同様とした。詳細を以下に示す。

28 日封かん養生した供試体を 120℃の乾燥炉で 7 日間乾燥させた。乾燥させた供試体を 40×40mm の 1 面以外を気密防水テープでシーリングし、表面に純度 99.9%以上の結晶塩を散布し、図-8 に示すような密閉容器中に設置し、温度 20℃、相対湿度 100% (水道水) もしくは 85% (KCl による飽和塩法) の環境で暴露した。相対湿度 100%の環境下では結晶塩を散布量については、0, 0.02, 0.05, 1.0g/cm² とし、相対湿度 85%の環境下では結晶塩を散布量については、0, 1.0g/cm² とした。所定の暴露日数 (7, 14, 29 日) が経過した後に図-9 に示すように各供試体片の厚さが 20~30mm 程度になるように切断し、3 章で示した方法と同様の方法で試験片中の水分量および全塩化物イオン量を測定し、内部の分布を求めた。

2 章、3 章の実験と異なり、1g/cm² と散布量を過大にした水準を設けたのは、実験期間中表面の結晶塩が供試体内部に全て浸透しないようにするためである。

4.2 実験結果および考察

図-10 に相対湿度 100%の環境で暴露した供試体中の水分分布の経時変化、図-11 に相対湿度 85%の環境で暴露した供試体中の水分分布の経時変化を示す。図-12 に相対湿度 100%の環境で暴露した供試体中の Cl⁻分布の経時変化、図-13 に相対湿度 85%の環境で暴露した供試体中の塩 Cl⁻分布の経時変化を示す。

図-10 より、相対湿度 100%で暴露した供試体は、結晶塩が存在することで、内部への水分の浸透量が明確に増加し、それは表面に散布した結晶塩の量が多いほど増加する。3 章の薄板供試体と異なり結晶塩の散布量の増加に伴い、水分の浸透量が増加する理由としては、0.05, 0.02 のものは供試体表面に散布した結晶塩が潮解により生じた凝縮水とともに全て内部へ浸透し、供試体表面に結晶塩と凝縮水が存在しなくなったことと、0.02 は 0.05 よりはやく供試体表面に散布した結晶塩が潮解により生じた凝縮水とともに全て内部へ浸透したこと、モルタル表面近傍の空隙中の液状水の塩分濃度が結晶塩の散布量の低下に伴い低下することで吸湿速度が低下しているこ

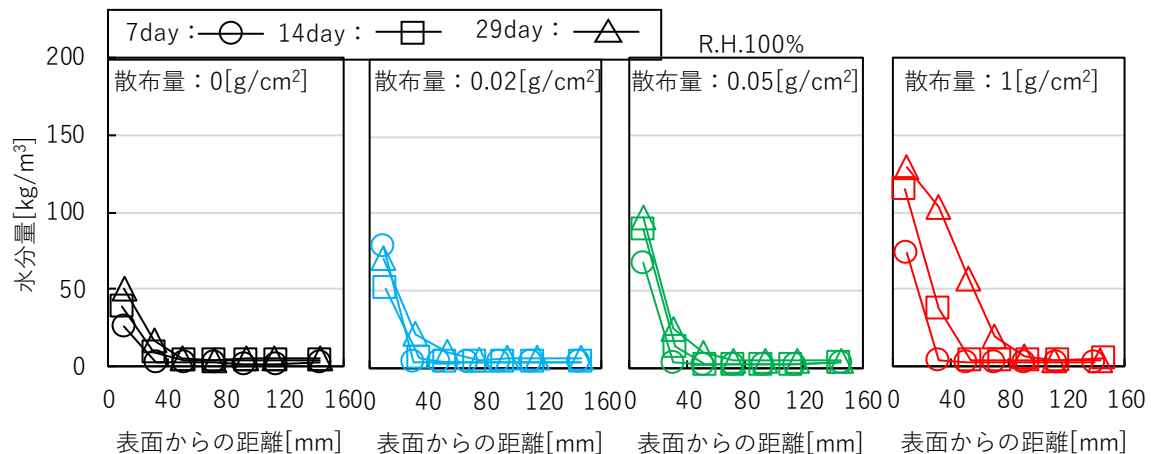


図-10 水分分布の経時変化 (R. H. 100%)

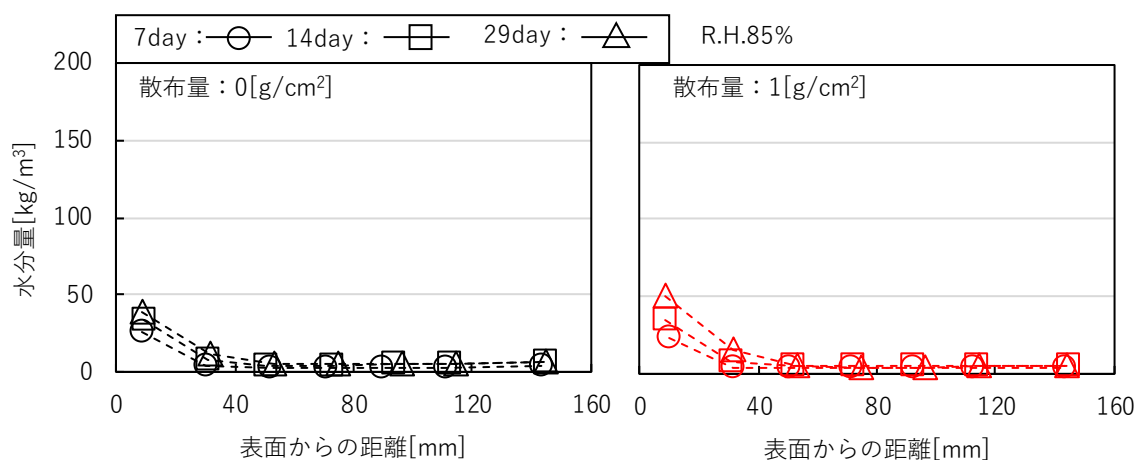


図-11 水分分布の経時変化 (R. H. 85%)

とが関係していると考えられる。

水分が浸透している深さについては、1.0のものについては、時間の経過に伴い明確に大きくなり、29dayのように暴露時間が長くなると、吸水による水分の浸透のように飽和領域を形成しているが、0.05、0.02のものについては、結晶塩が存在しないものと同程度となる。このことから、表面に存在する凝縮水の存在が内部の水分移動におよぼす影響が大きいと考えられる。また、表面に潮解による凝縮水が長期間存在する場合、内部の水分移動は吸水と同じような挙動を呈す可能性を示唆している。

図-11より、相対湿度85%で暴露した供試体については、暴露7、14日の水分浸透量は結晶塩の有無によらずほぼ同じであるが29日では結晶塩が存在するものの水分浸透量が多少大きくなる。その理由としては、相対湿度低くなることで、潮解による結晶塩の凝縮速度が低下し、内部に浸透するのに必要な凝縮水が生じるまでに時間がかかることが関係していると考えられる。

図-10、12より、結晶塩の散布量によらず、水分が浸透している箇所に対応して塩分が浸透している。詳細に

確認すると、表面からの距離が大きいほど、水分の浸透量に対して、塩分の浸透量が小さいことが確認できる。この理由としては、水分の浸透過程で塩化物イオンの吸着や固定にされることで表面から距離が大きくなるほど水分中の塩化物イオン量が減少することが関係していると考えられる。

図-11、13より、結晶塩が存在しないものと比較して水分浸透の挙動がほぼ同じである暴露7、14日では塩分が一切浸透していないが、水分浸透量が多少大きくなる暴露29日になると塩分が浸透していることが確認できる。その理由としては、内部に浸透するのに必要な凝縮水が生じるまでに時間がかかることが関係していると考えられる。

以上のことから、結晶塩の潮解によるコンクリート内部への水分の移動を考慮する際には、表面に存在する結晶塩および凝縮水の量を適切に把握し、その量に応じて、内部の水分の移動速度を変化させる必要があるといえる。また、潮解によるコンクリート中の水分の移動は凝縮水の浸透だけでなく、水蒸気の移動を適切に考慮する必要

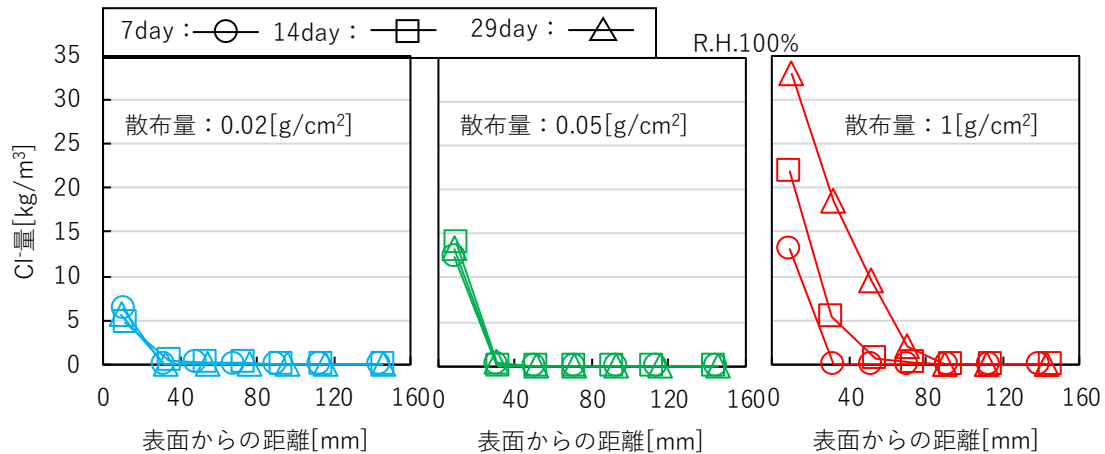


図-12 Cl^- 分布の経時変化 (R. H. 100%)

があるといえる。そして、塩分の移動については、供試体表面に凝縮水が存在している場合では、凝縮水の浸透に伴う塩分の移動の影響が大きいといえる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 潮解による結晶塩への凝縮水の凝縮速度は、凝縮水の濃度が高いほど大きくなり、それは凝縮水が呈す飽和水蒸気圧とその時の雰囲気の水蒸気分圧の差に概ね比例することがわかった。
- 2) 潮解によるコンクリート表面近傍への水分の伝達は、結晶塩への凝縮水の量が少ない場合では、水蒸気の吸湿による影響が大きく、表面に存在する凝縮水の量が十分多くなれば、凝縮水の浸透の影響が大きくなることがわかった。
- 3) 潮解によるコンクリート表面近傍への塩分の伝達は、表面に存在する凝縮水の浸透に伴うものの影響が大きく、表面の凝縮水の濃度も影響することがわかった。
- 4) 潮解によるコンクリート中の水分の移動は、結晶塩への凝縮水の量の影響が大きく、凝縮水が存在し続ける場合では、相対湿度 100%の水蒸気の吸湿より水分の浸透量および浸透深さが明確に大きくなる。一方、表面の凝縮水が消失する場合、相対湿度 100%の水蒸気の吸湿と水分の浸透深さは同程度になることがわかった。
- 5) 潮解によるコンクリート中の塩分の移動は、表面に凝縮水が存在している場合では、凝縮水の浸透に伴う塩分の移動の影響が大きいことがわかった。

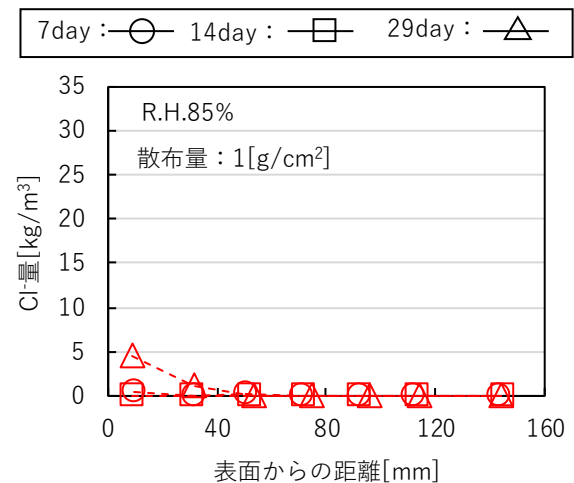


図-13 Cl^- 分布の経時変化 (R. H. 85%)

参考文献

- 1) 丸屋剛：コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析手法の構築，東京大学学位論文，1995
- 2) Chaube, R. P., Kishi, T. and Maekawa, K. : An integrated computational framework for predicting the long-term durability of cementitious materials, CONSEC '98, Vol. 1, pp. 104-113, 1998.
- 3) 小林悟志，下村匠：コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp831-836, 2002.7
- 4) 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.
- 5) 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, pp. 745-750, 2015.