

論文 環境条件がコンクリートの水分逸散および移流に与える影響

藤田 和哉*1・加藤 絵万*2・加藤 佳孝*3・高橋 駿人*4

要旨：本研究では、環境条件がコンクリートの水分逸散および移流に与える影響を把握することを目的として屋外試験および室内試験を実施した。屋外試験では、飽水状態の供試体を屋外に暴露し、水蒸気拡散のメカニズムに基づいて水分逸散量を整理した結果、乾燥初期では風の影響がコンクリートの水分逸散に与える影響が大きく、表面の水分がある程度乾燥した後は、水蒸気拡散がコンクリートの水分逸散に与える影響が大きくなることを定量的に理解することが出来た。室内試験では、供試体を異なる乾燥環境下で乾燥させた後に、塩水吸水試験を実施した結果、同一の水分逸散量でも乾燥温度の増加および相対湿度の低下に伴い塩水吸水量が増加した。

キーワード：水分逸散, 塩化物イオン, 水蒸気拡散, 移流

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化要因の1つとして塩化物イオンの存在に起因する塩害が挙げられ、コンクリート中の塩化物イオンの移動を理解することは重要である。コンクリート中への塩化物イオンの侵入現象として、干満帯および飛沫帯の環境下では、乾湿繰り返し環境下であるため、水分の移動に伴う移流が要因の一つとなる。そのため、実環境での移流の影響を把握することは重要である。ここで、乾湿繰り返しに伴う移流は、乾燥による水分逸散と水分浸透の2つの現象に分けることができる。実環境での水分逸散については、日射や気温等の気象条件による影響が大きいことが明らかとなっており、気象条件から水分逸散量を推定することが出来ればより実環境での移流の影響の理解に繋がる。水分浸透については、水分逸散量の増加に伴い、より内部まで水分が浸透することが定性的に理解できる。しかし、既往の研究²⁾ではコンクリート中の水分の存在が水分浸透の抵抗となることが指摘されており、乾燥環境により同一の水分逸散量でも移流の影響が異なる可能性がある。

以上のことを踏まえ、屋外試験では水蒸気拡散のメカニズムに基づいて、気象条件と水分逸散量の関係を整理し、室内試験では、異なる乾燥環境下で乾燥させた後、塩水を吸水させ、水分逸散量と塩化物イオン浸透深さの関係を把握する実験を実施した。

2. 屋外試験

2.1 試験概要

(1) 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは、普通ポルトランドセメント(C:密度 3.15g/cm^3)を使用した。細骨材は、富士川産川砂(S:表乾密度 2.62g/cm^3 ,粗粒率2.89)を使用した。粗骨材は秩

父産コンクリート用砕石 2005(G:表乾密度 2.72g/cm^3 ,粗粒率 6.58)を使用した。練混ぜ水は、上水道水(W)を使用した。

供試体に用いたコンクリートの配合およびコンクリートの試験結果は、表-1のCase1である。

(2) 供試体作製

$\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を作製した。コンクリートの打設は室温 20°C の実験室にて行った。打設後24時間で脱型し、その後、温度 20°C の室内で材齢3年まで水中養生した。

水中養生終了後、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体を $\phi 10 \times 5\text{cm}$ に切断し、切断面の1面を蒸発面とし、蒸発面以外の面にエポキシ樹脂を塗布した。その後、図-1および図-2に示すように蒸発面から 0.5cm 間隔で異なる3か所に穴を空け、温湿度センサーをそれぞれの穴に埋め込んだ。センサーには、 $\pm 1.5\%$ の精度で低温、結露環境下でも測定可能な静電容量式センサーを用いた。センサーを挿入後、孔をシリコンで被覆した。温湿度センサーはデータロガーと接続して、センサー埋込み位置の温湿度を測定した。

(3) 試験概要

暴露試験は、(2)で作製した各供試体を蒸留水に浸せきし、3日間の質量変化がないことを確認した後、その日の11時から16時までの5時間屋外で暴露することを1サイクルとした。測定は、図-1に示すように2体の供試体を用意し、1体は質量測定用として質量計による試験体の質量(g)を、1体は表面温度および内部温湿度測定用として、温湿度センサーによる表面温度($^\circ\text{C}$)、内部温度($^\circ\text{C}$)、内部湿度(%),を測定した。なお、表面温度は温湿度センサーを蒸発面に養生テープで貼り付けることにより測定している。また、写真-1に示す気象デー

*1 東京理科大学 理工学研究科 土木工学専攻 (学生会員)

*2 港湾空港技術研究所 客員研究員 博士 (工) (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部 土木工学科 教授 博士 (工) (正会員)

*4 東京理科大学 理工学部 土木工学科 助教 博士 (工) (正会員)



写真-1 小型気象計

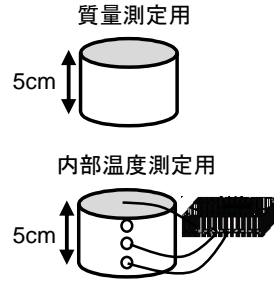


図-1 供試体

タをリアルタイムで実測可能な小型気象計から気温(°C)、相対湿度(%)を1分間隔のデータとして入手した。コンクリート供試体は、千葉県野田市にて小型気象計の近くの日当たりがある場所に暴露した。なお、供試体質量および供試体表面温度、内部温湿度の測定はそれぞれ1体の供試体で行った。

2.2 水蒸気拡散

水蒸気の拡散フラックスは、Fickの第1法則で示されるように、水蒸気の拡散係数に水蒸気量の勾配を乗じることで得られる。柳ら³⁾はこれを、図-3に示すように非飽水状態のコンクリート内部で、水蒸気の拡散フラックス m_v (kg/m²・s)を、飽水域の界面近傍の水蒸気量 ρ_{vi} (kg/m³)と非飽水域上面の水蒸気量 ρ_{vs} (kg/m³)の差を水蒸気拡散の駆動力とし、非飽水域の厚さ D (m)を水蒸気移動の抵抗として式(1)で表している。

$$m_v = -D_{vap} \frac{\rho_{vs} - \rho_{vi}}{D} \quad (1)$$

D_{vap} (m²/s)は空隙の複雑さを考慮した水蒸気の拡散係数であり、空隙の複雑さを表す係数 α および空気中の水蒸気の拡散係数 D_{air} (m²/s)を用いて式(2)で表す。

$$D_{vap} = \alpha D_{air} \quad (2)$$

また、水蒸気の拡散係数 D_{air} は温度 T を用いて経験的に式(3)で与えられる⁴⁾。

$$D_{air} = 2.2 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1.75} \quad (3)$$

式(1)の飽水域の界面近傍の水蒸気量 ρ_{vi} および乾燥域近傍の水蒸気量 ρ_{vs} は、飽和水蒸気量 $\rho_{vsat}(T)$ (kg/m³)および飽水域界面の相対湿度 RH_s (%), コンクリート表面近傍の相対湿度(%) RH_i を用いて式(4), (5)で表せられる。

$$\rho_{vi} = \rho_{vsat}(T_i) \times \frac{RH_i}{100} \quad (4)$$

$$\rho_{vs} = \rho_{vsat}(T_s) \times \frac{RH_s}{100} \quad (5)$$

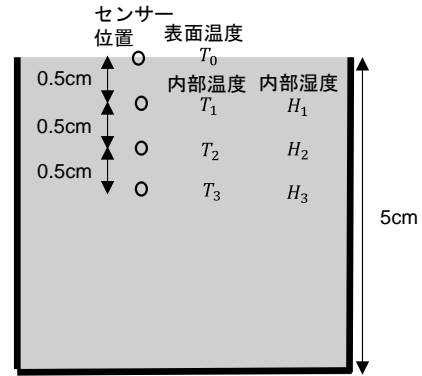


図-2 センサー位置

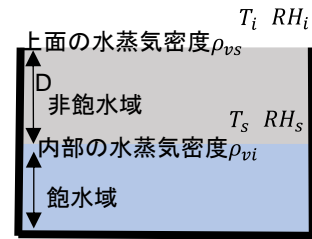


図-3 非飽水状態のコンクリート

ここで、 RH_s は飽水域の界面であるため、100%を用いる。また、飽和水蒸気量 $\rho_{vsat}(T)$ は飽和水蒸気圧 $e(T)$ を用いて式(6)で表せられる。

$$\rho_{vsat}(T) = 217 \times \frac{e(T)}{T + 273.15} \quad (6)$$

さらに、飽和水蒸気圧 $e(T)$ はTetensの式より式(7)で与えられる。

$$e(T) = 6.1078 \times 10^{\left(\frac{7.5T}{T+237.3}\right)} \quad (7)$$

次に、各パラメータの決定方法について述べる。飽水状態のコンクリートを乾燥させた場合、水分逸散に伴い非飽水域の厚さ D が増加し、さらには飽水域界面位置での温度 T_s が変化する。これらの値を時間に対して連続的に把握する測定は非常に困難であることから、本研究では、図-2に示すように設置した温湿度センサーの測定結果から、次のように扱うこととした。すなわち、 D の値は、内部湿度 H_1 が低下傾向を示すまでは0.25cm、内部湿度 H_1 が低下傾向を示してから内部湿度 H_2 が低下傾向を示すまでは0.75cm、内部湿度 H_2 が低下傾向を示してから内部湿度 H_3 が低下傾向を示すまでは1.25cmとした。 T_s については、内部湿度 H_1 が低下傾向を示すまでは T_0 と T_1 の平均値、内部湿度 H_1 が低下傾向を示して

表-1 コンクリートの配合およびフレッシュ性状試験結果

Case	W/B (%)	BS/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SL (cm)	Air (%)
				W	C	B	S	G		
1	50	0	45	165	330	0	817	1033	13	5.5

から内部湿度 H_2 が低下傾向を示すまでは T_1 と T_2 の平均値、内部湿度 H_2 が低下傾向を示してから内部湿度 H_3 が低下傾向を示すまでは T_2 と T_3 の平均値とした。 T_i および RH_i については、小型気象計から観測される気温および相対湿度のデータを用いた。式(3)の水蒸気の拡散係数を算出する際に必要な温度 T は T_s の値を用いた。

ここで、 m_v は水蒸気拡散のしやすさを表す指標であるが、屋外では、気象条件により環境が変化するため、 m_v も経時的に変化する。そのため、経時的な影響を考慮した指標を、式(8)に示すように、 m_v を実験開始から2分間隔で累積させたものとし、また、式(9)に示すように α を除いた項を A として、この値と水分逸散量の関係について整理した。

$$\int_{t=1}^{t=n} m_v dt = \alpha \sum_{t=1}^{2n-1} D_{airt} \frac{\rho_{vst} - \rho_{vit}}{D_t} \quad (8)$$

$$\alpha \sum_{t=1}^{2n-1} D_{airt} \frac{\rho_{vst} - \rho_{vit}}{D_t} = \alpha A \quad (9)$$

2.3 試験結果

図-4 に試験開始から、30分、60分、180分、300分後の水分逸散量の経時変化を示す。なお、図に示す結果は8月1日、8月31日、9月27日、10月11日、11月22日、12月5日、12月20日に測定したものである。図-4より、気象条件により経時的な水分逸散量が異なることが分かる。

次に、図-5 に A の値と図-4 のそれぞれの時間での水分逸散量の関係を示す。8月1日のデータについてはデータロガーの不調により、試験開始から30分と60分の結果のみを用いている。図-5より、初期では A の値が殆ど変化していない状況で水分逸散量が増加している。その後、水分逸散量が変化しない状況で A の値が増加し、 A の値がおおよそ $0.2(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以降では、 A の値の増加に伴い水分逸散量が増加している。ここで、風がコンクリートの水分逸散に与える影響として、コンクリート内部からの水分の蒸発によりコンクリート上部に停滞した水蒸気を除去し、さらにコンクリート表面から水分を蒸発させやすくすることが考えられる。そのため、蒸発量の大きい飽水状態からの乾燥初期では、コンクリート内部での水蒸気拡散と比較して風の方がコンクリートの水分逸散量に与える影響が大きいことが考えられる¹⁾。そのため、水蒸気の拡散のしやすさのみを表した式(8)では、風がコンクリートの水分逸散に対して与える影響を考慮されておらず、 A の値がほとんど変化しない状況で水分逸散量が増加していると考えられる。次に、 A の値がおおよそ $0.2(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以降では、 A の値の増加に伴い、水分逸散量が増加している。これは、コンクリート表面の水分がある程度逸散した後は、コンクリート中が非飽水状態となり、コンクリート内部の水蒸気の拡散過程が

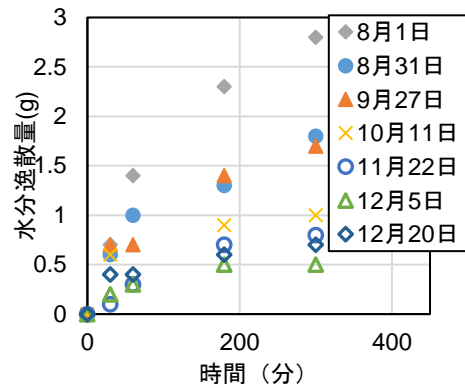


図-4 水分逸散量の経時変化

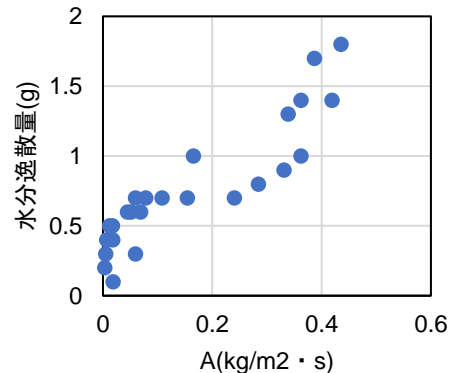


図-5 A と水分逸散量の関係

律速となることで、式(8)の水蒸気の拡散による影響が大きくなったためであると考えられる。また、図-5の水分逸散量が変化しない状況で A の値が増加している領域については、風の影響が大きい領域から水蒸気拡散の影響が大きい領域に移るための推移域であると考えられる。

今後、データを増やしていく必要があるが、経時的にコンクリートの内部温度および大気中の気温、相対湿度を測定し、式(8)を用いることにより、乾燥初期以降での水分逸散量を推定できる可能性がある。

3 塩水吸水試験

3.1 試験概要

(1) 使用材料および配合

セメントは、普通ポルトランドセメント (C : 密度 $3.15\text{g}/\text{cm}^3$) を使用した。混和材は、高炉スラグ微粉末 (BS : 密度 $2.91\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3830\text{cm}^2/\text{g}$) を使用した。細骨材は、多摩産砕砂 (S : 表乾密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率 2.82) と君津産砕砂 (S : 表乾密度 $2.57\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率 1.52) を混合したものを使用した。粗骨材は多摩産砕砂 (G :

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状試験結果

Case	W/B (%)	BS/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SL (cm)	Air (%)
				W	C	B	S	G		
2	50	0	45	165	330	0	820	1006	9	5.5
3		50			165	165	815	1000	16	4.6

表乾密度 2.67g/cm³, 粗粒率 (6.58) を使用した。練混ぜ水は、上水道水 (W) を使用した。配合は表-2 の Case2 および Case3 であり、2 と同様に W/B=50% とし、高炉スラグ微粉末の置換率は 0, 50% の 2 水準とした。

(2) 供試体作製

供試体はそれぞれの配合で 10×10×40cm の角柱供試体を作製した。打設後 24 時間で脱型し、養生は水中養生を 28 日間実施した。水中養生終了後、10×10×40cm の供試体を 10×10×5cm となるように切断し、それぞれの供試体に対して、切断面の 1 面を除いてエポキシ樹脂を塗布した。

(3) 試験方法

(2) で作製した供試体を蒸留水に浸せきさせ、3 日間の質量変化がないことを確認した後、エポキシ樹脂が塗布されていない面を蒸発面とし、表-3 に示す乾燥環境で乾燥させた。なお、基本的に温度および相対湿度の調整は恒温恒湿槽を用いて行っているが、20℃, RH30% の環境は、20℃一定のデシケーター内で硫酸ナトリウムの飽和塩を用いることによって調整している。また、それぞれの乾燥環境で 3 体の供試体を用いており、乾燥時間については表-4 に示すようにそれぞれの乾燥環境で 3 水準としている。なお、乾燥の程度の把握は定期的に質量を測定することにより行っている。次に、それぞれの環境下で乾燥開始から表-4 に示す時間乾燥させた供試体に対して、塩水吸水試験を実施した。塩水吸水試験は図-6 に示すように蒸発面を浸せき面とし、水面から 5mm 程度の深さまで浸せきさせた。また、吸水させる塩水の濃度は 10% とし、試験は 20℃ の環境下で実施した。試験時間は吸水開始から 24 時間とし、吸水直前と吸水開始から 24 時間後の供試体の質量を測定した。試験終了後、供試体を割裂し、硝酸銀噴霧法により塩化物イオン浸透深さを 10 点測定し、その平均値を結果として用いた。

3.2 試験結果

図-7 および図-8 に水分逸散量と塩化物イオン浸透深さ、図-9 および図-10 に吸水開始から 24 時間後の塩水吸水量と塩化物イオン浸透深さの関係を示す。それぞれの配合で、水分逸散量および塩水吸水量の増加に伴い塩化物イオン浸透深さが増加している傾向にある。しかし、決定係数に着目すると、それぞれの配合で水分逸散量と塩化物イオン深さの関係の決定係数は、OPC は 0.76, B50 では 0.68, 塩水吸水量と塩化物イオン浸透深

表-3 乾燥環境

Case	a	b	c	d	e
温度(℃)	20	20	30	30	40
相対湿度(%)	60	30	60	30	30

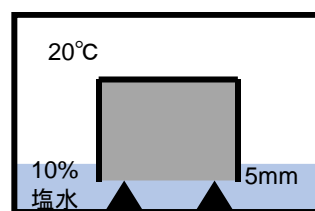


図-6 塩水吸水試験

表-4 乾燥時間

	塩水吸水試験を実施するまでの乾燥時間	
	Case2	Case3
Case a	12 日, 26 日, 68 日	5 日, 26 日, 68 日
Case b	13 日, 26 日, 54 日	13 日, 26 日, 39 日
Case c	8 日, 19 日, 23 日	8 日, 19 日, 23 日
Case d	5 日, 13 日, 29 日	5 日, 13 日, 26 日
Case e	5 日, 10 日, 19 日	5 日, 10 日, 19 日

さの決定係数は、OPC は 0.91, B50 では 0.89 となっており、水分逸散量と塩化物イオン深さの関係の決定係数は、塩水吸水量と塩化物イオン浸透深さの決定係数と比較して小さくなっている。そのため、水分逸散量のみの情報から塩化物イオン浸透深さを正確に推定することは難しいと言える。

ここで、図-11 および図-12 に環境毎に整理した水分逸散量と吸水開始から 24 時間後の塩水吸水量の関係を示す。全体で見るとそれぞれの配合で水分逸散量の増加に伴い塩水吸水量が増加している傾向にある。しかし、例えば、図-11 および図-12 の点線付近を見ると、乾燥環境により、同一の水分逸散量に対して塩水吸水量が異なっている。乾燥環境が水分逸散量と塩水吸水量の関係に与える影響を理解する上では、同一の水分逸散量に対しての塩水吸水量を環境毎に比較することを、任意の水分逸散量で検討できるとよい。しかし、このことを実測値で表現することは難しいため、ここでは、環境毎の水分逸散量と塩水吸水量の関係から求めた傾きに注目して考察する。そこで、図-13 にそれぞれの環境毎の水分逸散量と塩水吸水量の近似直線の傾きを示す。水分逸散量と塩水吸水量の近似直線の傾きは、環境温度の増加に伴い増加している。また、同一の環境温

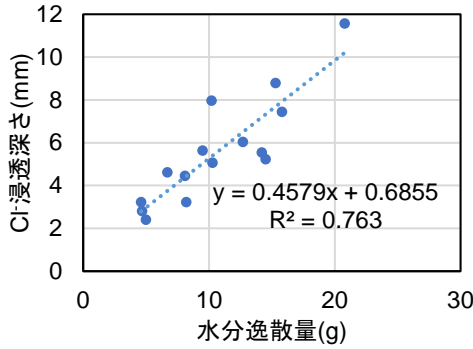


図-7 水分逸散量とCl⁻浸透深さ (Case2)

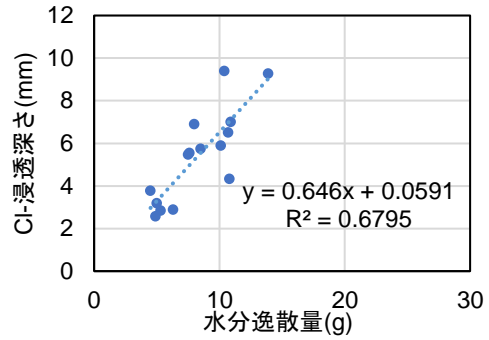


図-8 水分逸散量とCl⁻浸透深さ (Case3)

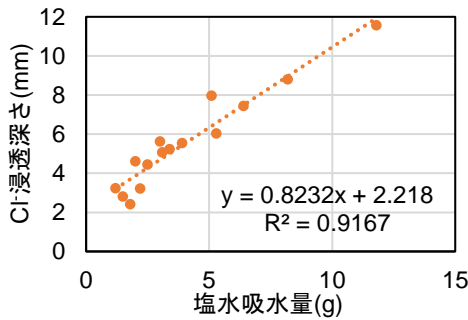


図-9 塩水吸水量とCl⁻浸透深さ (Case2)

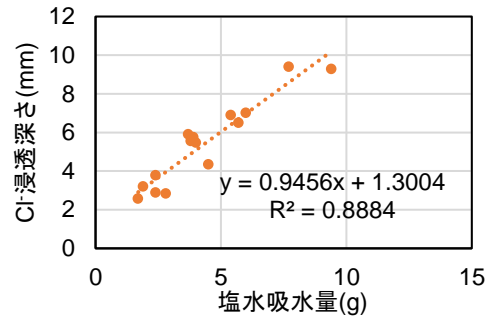


図-10 塩水吸水量とCl⁻浸透深さ (Case3)

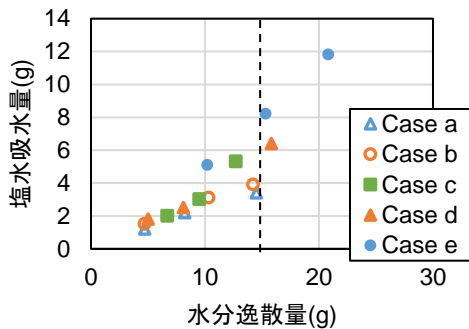


図-11 水分逸散量と塩水吸水量 (Case2)

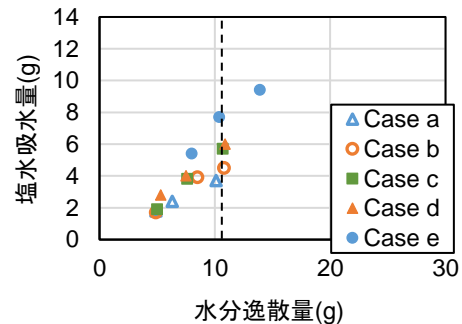


図-12 水分逸散量と塩水吸水量 (Case3)

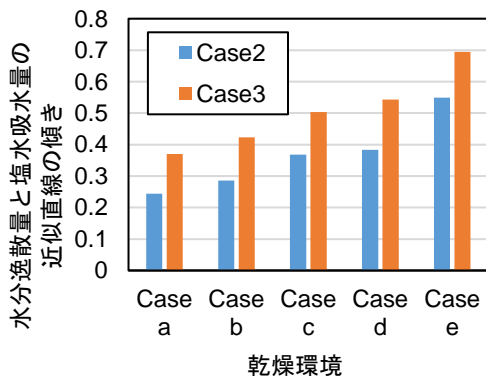


図-13 水分逸散量と塩水吸水量の近似直線の傾き

度での比較では、いずれの環境温度でも相対湿度30%の場合の方が60%の場合と比較して大きくなっている。これらのことは、同一の水分逸散量でも乾燥温度の増加および相対湿度の低下に伴い塩水吸水量が増加することを

示している。さらには、図-9および図-10より、塩水吸水量と塩化物イオン浸透深さの関係は概ね相関関係があることを考慮すると、同一の水分逸散量でも乾燥温度の増加および相対湿度の低下に伴い塩水吸水量が増加し、それに伴い、塩化物イオン浸透深さも増加することを表している。

ここで、気液平衡となるメニスカス半径と絶対温度および相対湿度の関係として、式(10)のケルビン式が与えられる。

$$r = -\frac{2\gamma V_m}{RT \ln(h)} \quad (10)$$

ここに、 r ：空隙半径(m)、 γ ：水の表面張力(N/m)、 V_m ：水のもル体積(m³/mol)、 R ：気体定数(J/mol・K)、 T ：絶対温度(K)、 h ：相対湿度(%)である。

式(10)より絶対温度の増加および相対湿度の低下により、より小さい径に凝縮されている水分が逸散できるこ

とが分かる。そのため、乾燥温度の低下および相対湿度の増加に伴い、コンクリート中により大きい径の液状水が存在していることが考えられる。今後検証を重ねていく必要はあるが、同一の水分逸散量でも乾燥環境によりコンクリート表面からの飽水度分布が異なっている可能性が高い。さらには、既往の研究²⁾でコンクリート内に存在する液状水の存在が、移流の抵抗になることが示唆されている。これらのことと、実験結果より、コンクリート中に液状水として存在する空隙径の増加に伴い、移流の抵抗の影響が増加し、塩化物イオン浸透深さが低下することが考えられる。

次に配合毎で比較すると、図-13より、水分逸散量と塩水吸水量の関係の近似直線の傾きは、全ての環境で普通ポルトランドセメントのCase2と比較して高炉スラグ微粉末が含まれているCase3のほうが大きくなっている。これは、Case2よりCase3の方が、同一の水分逸散量に対して、水分が浸透しやすいことを表している。ここで、一般的には、水分は微小な空隙と比較して粗大な空隙のほうが浸透しやすいことが考えられる。また、既往の研究⁵⁾では、モルタル表層では、普通ポルトランドセメントと比較して高炉スラグ微粉末を用いた場合の方が全空隙に占める粗大な空隙の割合が大きいという結果が得られている。これらのことから、Case2と比較してCase3の方が、水分が逸散した空隙に対する粗大な空隙の占める割合が大きく、より水分が浸透したことが考えられる。

5. まとめ

環境条件がコンクリートの水分逸散および移流に与える影響として、屋外試験および塩水吸水試験を実施した結果、次の知見が得られた。

(1) 屋外試験の結果より、飽水状態の供試体に対して

水蒸気拡散のメカニズムに基づいて水分逸散量を整理した結果、乾燥初期では風が水分逸散に与える影響が大きく、その後推移域を経て、コンクリート表面の水分がある程度乾燥した後、水蒸気拡散がコンクリートの水分逸散に与える影響が大きくなることを定量的に理解することができた。

(2) 塩水吸水試験の結果より、同一の水分逸散量でも乾燥温度の増加および相対湿度の低下に伴い塩化物イオン浸透深さは増加することがわかった。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号19H02218）の助成を受けて実施した。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 藤田和哉，加藤絵万，加藤佳孝，高橋駿人：気象条件がコンクリートの乾燥に与える影響，コンクリート工学年次論文集，vol.44，pp.484-489，2022
- 2) 鎌田知久，岸利治：微小空隙に存在する液状水が移流による塩分浸透に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.849-854，2016
- 3) 柳博文，福原輝幸，脇敬一，松岡茂：不飽和コンクリート中の水蒸気移動特性と水蒸気拡散係数，コンクリート工学年次論文集，Vol.12，No.3，pp.61-67，2001
- 4) 酒井正樹，人見尚，平田隆祥，一瀬賢一：加熱・乾燥を受けるコンクリートの水分予測に関する研究，大林技術研究所報，No.77，pp.1-8，2013
- 5) 江俊頤，加藤佳孝，加藤絵万：乾燥・吸湿過程のモルタルの内部相対湿度と飽水度に関する実験的検討，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.21，pp.121-124，2021