

論文 自然環境下におけるセメント硬化体の変質と酸素および塩化物イオンの拡散性状に関する研究

須田 裕哉*1・長嶺 剛*2・富山 潤*3

要旨: 本研究は、地域間の異なる環境作用を受けたセメント硬化体の物質移動性状を微細構造の変化に着目し検討を行った。任意の乾燥条件下の検討結果との比較から、環境作用を受けたセメント硬化体の酸素および塩化物イオンの拡散性状は、環境作用として乾燥の影響だけでなく炭酸化も大きく影響することを示した。また、異なる暴露地点の検討から、酸素および塩化物イオンの拡散係数の変化は暴露地点によって異なり、温度が高い地点ほど乾燥や炭酸化が進行しており、空隙構造も大きく変化した。さらに、酸素の拡散性状は、材料や配合、環境作用の違いによらず空隙の量や連続性の影響が支配的であることを示した。

キーワード: 酸素の拡散係数, 塩化物イオンの拡散係数, 乾燥, 炭酸化, 空隙構造

1. はじめに

自然環境下に曝されたコンクリート構造物は供用期間中に乾湿繰返しや炭酸化などの様々な環境作用を受けることで、コンクリートの品質が変化し、これら品質の変化が強度や耐久性に影響する。中村ら¹⁾は実環境下において乾湿繰返し作用を受けることで、凍害に対する抵抗性が低下することを明らかにしている。また、塩分の浸透性状において、志村ら²⁾や著者ら³⁾は、実験室の検討で任意の乾燥作用を供試体に与えた場合、塩分の浸透量や拡散係数が増加することを示した。さらに、品田ら⁴⁾は炭酸化した供試体において、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混和の有無によって、塩化物イオン拡散係数の変化の傾向が異なることを報告している。

これらコンクリートの性能の変化は、環境作用を受けたことによる空隙構造の変質が一因として説明されている。特に、中村らの検討では、沖縄は北海道や東京と比べて、夏季の乾燥の影響が大きく作用し空隙が粗大になりやすい環境にあり、このような作用により耐凍害性が低下すると指摘されている¹⁾。したがって、コンクリートの品質の変化やそれに伴う性能の変化は、環境作用を受ける地域の気候条件によって異なるものと考えられる。

そこで、本研究では、セメント硬化体の性質としてイオンや気体の移動性状に着目し、実環境作用を受けたセメント硬化体の物質移動性状を明らかにすることを目的として、夏季を含めた6カ月間、沖縄と新潟の2地点に供試体の暴露を行い、回収後の供試体の酸素と塩化物イオンの拡散性状を調査した。また、暴露後の空隙構造や炭酸カルシウム生成量から乾燥や炭酸化の進行程度を評価した。さらに、実験室での検討として任意の乾燥を与えた供試体と実環境での暴露供試体との比較を行い、空

隙構造の観点から物質移動性状に及ぼす環境作用の影響の評価を試みた。

2. 実験概要

本研究では実験室での任意の湿度で乾燥作用を与えた供試体(シリーズ I)と実環境に暴露された条件下(シリーズ II)の2種類の環境条件で検討を行った。

2.1 供試体の概要(シリーズ I)

(1) 使用材料および配合

結合材として普通ポルトランドセメント(OPC)を用いた。表-1に OPC の物理的性質と化学成分を示す。水セメント比は35%, 45%, 55%の3種類とした。

(2) 供試体の作製と乾燥条件

供試体はペーストとした。練混ぜ水にはイオン交換水を使用し、3分間ペーストの練混ぜを行った。練混ぜ後、ブリーディングが確認されなくなるまで20°Cの恒温室内で定期的に練返しを行った。ブリーディングが確認されなくなった後、ペーストは、30×40×5mmの亚克力枠へ打設した。供試体は材齢1日で脱型し、飽和水酸化カルシウム溶液中で材齢28日まで20°C水中養生を行った。材齢28日に、供試体を水酸化カルシウム溶液中から取り出し、飽和塩類を用いて20°C環境下で調湿したデシケーター内で約5ヶ月間静置し乾燥させた。デシケーター内には炭酸化防止のため、顆粒状の水酸化ナトリウムを入れた。表-2に調湿に用いた飽和塩類を示す。

2.2 供試体の概要(シリーズ II)

(1) 使用材料および配合

結合材として OPC, 高炉スラグ微粉末(BFS), フライアッシュ II 種(FA)を用いた。BFS は二水石膏を内割りで3.7%添加し、石膏有りの試料とした。表-1に BFS

*1 琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース 助教 博士(工学) (正会員)

*2 沖縄県庁 土木建築部 (非会員)

*3 琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 結合材の物理的性質と化学成分

| 結合材 | 密度 (g/cm ³) | 比表面積 (cm ² /g) | Ig.loss (%) | 化学成分 (%) | | | | | | | |
|-----|-------------------------|---------------------------|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|-------------------|------------------|
| | | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O |
| OPC | 3.16 | 3420 | 0.64 | 20.9 | 5.4 | 2.9 | 65.2 | 1.5 | 2.1 | 0.3 | 0.5 |
| BFS | 2.91 | 4180 | 0.09 | 34.6 | 14.8 | - | 42.7 | 5.7 | - | 0.2 | 0.3 |
| FA | 2.44 | 4310 | 3.40 | 50.7 | 25.0 | 8.7 | 4.3 | 3.2 | 0.7 | 0.7 | 1.7 |

表-2 飽和塩類と調整湿度

| 飽和塩類 | 湿度 (%) |
|---|--------|
| CH ₃ COOK | 22 |
| K ₂ CO ₃ | 43 |
| Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O | 56 |
| NaNO ₂ | 66 |
| NaCl | 75 |
| KCl | 85 |

とFAの物理的性質と化学成分を示す。水結合材比は50%とし、混和材の置換率は、BFSで50%、FAで30%とした。なお、本研究では、OPCのみの供試体をNC、OPC+BFSをNB、OPC+FAをNFと表記した。

(2) 供試体の作製と暴露条件

供試体はペーストとし、2.1(2)節と同様の手順で供試体を作製した。水和を十分に進行させるため、養生温度40℃で材齢60日とした。暴露供試体は、ペーストの半面にアルミテープと両面テープを貼り、実コンクリート部材に暴露面が地表面から水平となるよう貼付し暴露した。

暴露地域は沖縄と新潟の2地点とし、沖縄は日射や雨水の影響を直接受ける部材上部とこれら影響を大きく受けない部材下部の2種類とした。暴露期間は、1, 3, 6ヶ月(NCのみ)とし、沖縄の部材下部と新潟では暴露期間を6ヶ月とした。暴露期間中は温湿度ロガー(温度: ±0.3℃, 湿度: ±2%RH)より温度と湿度を計測した。なお、ロガーは供試体の近傍に設置しており、測定された温度と湿度はコンクリート表面付近の計測結果である。

図-1に、各地点の温度と湿度の変化を示す。新潟の2018/9/6以降のデータはロガーの故障により測定不可となっている。図より、沖縄の温度は暴露期間を通して新潟よりも高く、部材上部は40℃を越える場合もあるが、部材下部は温度変化が小さく20℃~30℃の間を推移した。沖縄(部材上部)と新潟の湿度は大きな違いはないが、沖縄の部材下部は湿度の変化が小さい結果となった。

2.3 測定項目

(1) 塩化物イオンの拡散係数の測定

乾燥および暴露後の供試体について、イオン交換水で24hの吸水処理を行い、その後拡散セル実験を行った。供試体を境に濃度0.5mol/LのNaCl水溶液とイオン交換水を、それぞれ0.2Lずつセル容器内に満たした。イオン交換水側の溶液を経時的に採取し、イオンクロマトグラ

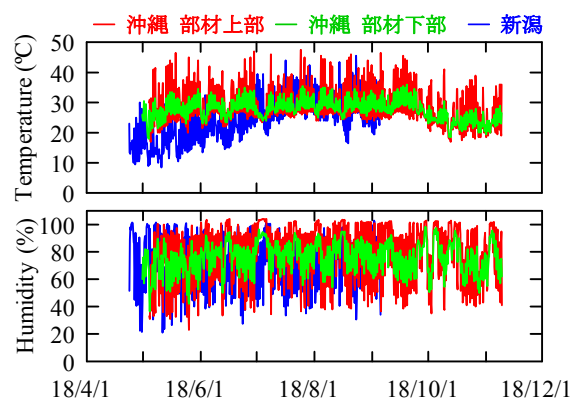


図-1 暴露地点の温度と湿度の変化

フィー(東ソー: IC2010)によって塩化物イオン濃度を測定した。濃度変化が定常になった後、その濃度勾配により、塩化物イオンの拡散係数を算出した。

(2) 酸素の拡散係数の測定

酸素の拡散実験は、白川ら⁵⁾が提案した気体の拡散実験装置により行った。乾燥および暴露後の供試体を減圧環境下のもと50℃で12時間乾燥させ、供試体の前処理条件を統一した。乾燥後の供試体は厚さ5mmの鋼製型枠(SUS303)にはめ込みシリコン系の接着剤で接着した。その後、型枠を境に酸素側と窒素側セルで挟み、酸素ガスと窒素ガスを等圧等流量で流し、流出した窒素ガス中の酸素濃度を測定することで酸素の拡散係数を求めた。酸素の拡散係数は、以下の白川らの提案式より求めた。

$$D_{O_2} = \frac{R_N \cdot (C_N - C_b) \cdot (L + \delta_N + \delta_O)}{\left\{ 1 - \frac{R_N}{R_O} \cdot \left(\frac{M_O}{M_N} \right)^{0.5} \cdot (C_N - C_b) - C_N \right\} \cdot A_C} \quad (1)$$

ここに、D_{O2}: 酸素の拡散係数 (m²/s), C_N: 窒素ガス中の酸素濃度(%), C_b: 窒素ガスボンベ中の酸素濃度(%), R_N, R_O: 窒素および酸素のガス流量 (m²/s), M_N, M_O: 窒素および酸素の分子量 (g/mol), L: 供試体厚さ(m), A_C: 供試体断面積 (m²), δ_N, δ_O: 窒素ガス側, 酸素ガス側の境界膜厚さ (0.0021m) である。

(3) 水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの測定

暴露供試体について、熱重量・示差熱測定(TG-DTA, リガク: Thermo plus EVO2)より、水酸化カルシウム量および炭酸カルシウム量を測定した。供試体を90μm以下に粉碎後、減圧環境下で3時間アセトン浸漬による水

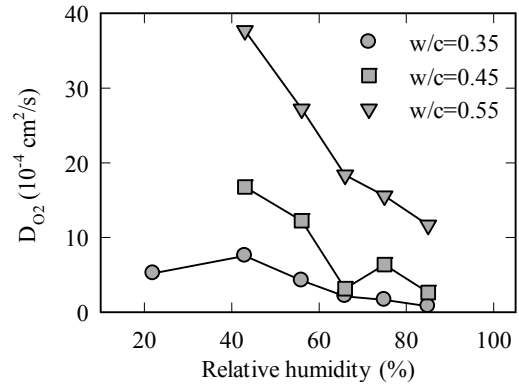
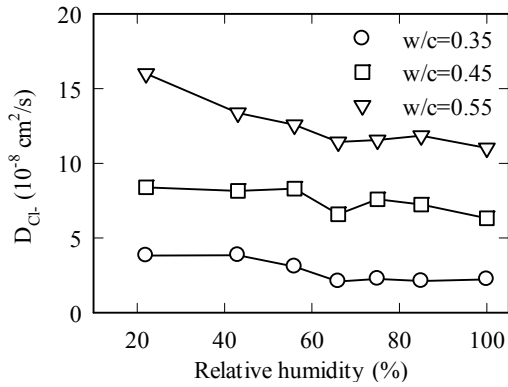


図-2 湿度の乾燥による塩化物イオンの拡散係数の変化 (左) と酸素の拡散係数の変化 (右)

和停止を行った。その後、吸引ろ過によりアセトンと試料を分離し、試料は塩化リチウムを用いて相対湿度 11% に調湿したデシケーター内で 2 週間以上乾燥させた。その後、試料を $18 \pm 1 \text{ mg}$ で秤量し窒素流通下 (流量: 100 ml/min.) で 1000°C まで試料を加熱した。水酸化カルシウム量は 450°C 域より、炭酸カルシウム量は $550^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 域の重量減少量より定量した。

(4) 空隙率の測定

アルキメデス法により供試体の空隙率を測定した。供試体は減圧下で 1 時間飽水処理を行い、その後、水中質量、表乾質量を秤量し、 50°C の乾燥炉内で 24 時間供試体を乾燥させ、乾燥前後の質量差から空隙率を求めた。

(5) 窒素吸着等温線の測定

測定の前処理として、シリーズ I, II の供試体を $2.5 \sim 5.0 \text{ mm}$ に粗砕し、 110°C で 1 時間真空脱気 (到達圧力 0.067 Pa) を行った。なお、窒素吸着試験時の試料の質量を $200 \text{ mg} \pm 10 \text{ mg}$ となるよう事前に 110°C 乾燥を行い、秤量前に調整した。BELsorp mini II (Microtrack BEL) によって窒素吸着等温線を取得した。窒素吸着の平衡条件は、150 秒間の窒素吸着量変化が $0.05 \text{ cm}^3/\text{g}$ 以内とした。

3. 実験結果

3.1 塩化物イオンの拡散係数と酸素の拡散係数

シリーズ I について、図-2 に各湿度で乾燥を行った供試体の塩化物イオンの拡散係数と酸素の拡散係数を示す。いずれの水セメント比の供試体において、乾燥時の相対湿度が低下することで塩化物イオンおよび酸素の拡散係数は増加する傾向を示した。また、水セメント比が高いほど、乾燥による拡散係数の変化が大きくなった。

図-3 に、シリーズ II における暴露期間の進行に伴う塩化物イオンの拡散係数と酸素の拡散係数の経時変化を示す。なお、同図に部材下部の結果も併せて示す。暴露期間の進行により酸素の拡散係数は増加したものの、塩化物イオンの拡散係数は減少し、図-2 の結果と異なる傾向を示した。また、部材下部に 6 ヶ月間暴露した供試

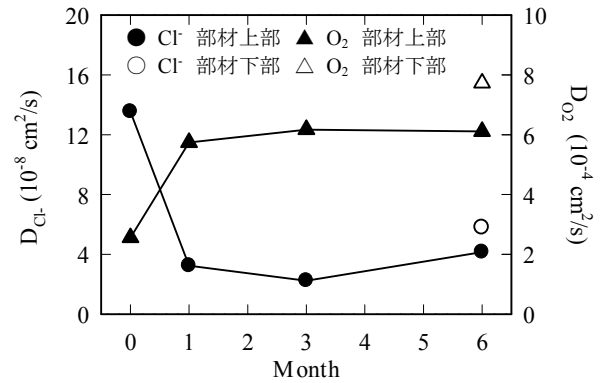


図-3 暴露期間における塩化物イオンおよび酸素の拡散係数の経時変化

体は、部材上部の結果と大きな差異を示さなかった。

図-4 に、6 ヶ月間沖縄および新潟に暴露した供試体の塩化物イオンの拡散係数を示す。なお、沖縄の結果は部材下部の日射等の影響を受けにくい環境であり、新潟の環境とは異なる。しかし、図-3 より、部材上部と下部で塩化物イオンと酸素の拡散係数は大きな違いを示さなかったため、両者の比較は可能と判断した。図より、NC では、新潟に暴露した供試体の拡散係数が増加する結果となった。NB と NF では、暴露によって拡散係数が増加し、新潟と比較して沖縄の暴露によって拡散係数の変化が大きくなった。図-5 に、沖縄および新潟に暴露した供試体の酸素の拡散係数を示す。酸素の拡散係数は暴露によって増加し、沖縄に暴露した供試体の拡散係数は新潟の結果よりも大きく変化した。

以上の結果より、シリーズ I とシリーズ II の結果を比較すると、酸素の拡散係数はシリーズ I, II とともに環境作用を受けることで増加する傾向を示したものの、塩化物イオン拡散係数はシリーズ I と II では異なる傾向を示した。これらは、暴露環境下では乾燥だけでなく炭酸化の影響も受けるためと考えられる。品田ら⁴⁾は、混和材を置換していない供試体では、炭酸化によって塩化物イオンの拡散係数が低下し、混和材を置換した場合には、拡散係数が増加することを報告している。これらは、混和

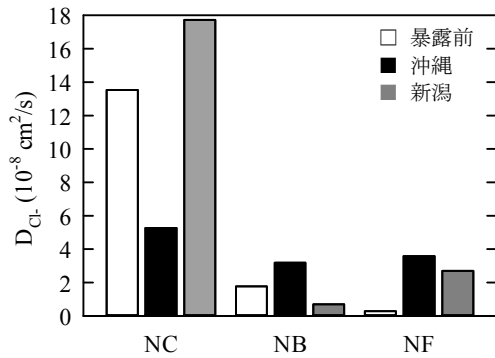


図-4 各暴露地点の塩化物イオンの拡散係数

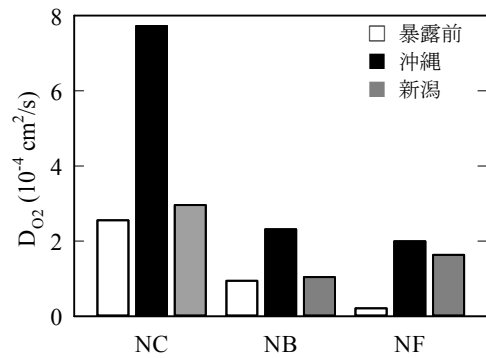


図-5 各暴露地点の酸素の拡散係数

材無置換の供試体では水酸化カルシウムの炭酸化によって炭酸カルシウムが空隙を充填すること、混和材を置換した供試体では、C-S-H等の炭酸化によって組織が多孔化するためと説明している。一方で、Ngala and Page⁶⁾は、酸素および塩化物イオンの拡散係数は、混和材の有無によらず炭酸化によって増加することを報告している。これら既往の研究の差異は炭酸化の進行程度に起因したものと推察され、暴露環境下では乾燥の影響だけでなく炭酸化進行の影響も考慮する必要があるため、炭酸カルシウムの生成量を調査した。

3.2 炭酸カルシウムの生成量

シリーズIIの暴露供試体において、図-6に暴露期間の進行による炭酸カルシウム量および水酸化カルシウム量を示す。なお、炭酸カルシウム量は、暴露後の水酸化カルシウムの減少量より求めた水酸化カルシウム由来の炭酸カルシウムと炭酸カルシウムの全量から水酸化カルシウム由来を差し引いたその他の水和物由来の炭酸カルシウムとして評価した。図より、暴露期間の進行とともに炭酸カルシウムの生成量は増加し、暴露3ヶ月までは水酸化カルシウム由来の炭酸カルシウムが占める割合が多くなった。その他の水和物由来の炭酸カルシウム量は3ヶ月以降に大きな増加を示して、長期的にはC-S-H等の水和物の炭酸化が進行していると考えられる。

図-7に、各暴露地点での炭酸カルシウムの生成量を示す。沖縄に暴露したNC(部材下部)の炭酸カルシウム量は、図-6の部材上部に暴露を6ヶ月行ったNCの結果とほぼ同程度の値を示しており、日射や雨等の影響によらず、炭酸化進行は同程度であった。図-7より、混和材の有無によらず、新潟と比較して沖縄の暴露条件下では、いずれの配合とも炭酸カルシウムが多く生成した。また、水酸化カルシウム以外の水和物由来の炭酸カルシウムが全体の半分以上を占めている。これらは、沖縄の温度が高いため、CO₂の拡散速度や反応速度が速く炭酸化進行が大きいためと推察される⁷⁾。また、新潟のNCに着目すると、炭酸カルシウム量が3%程度と他の供試体と比べもっとも少ない。このことから、図-4の新

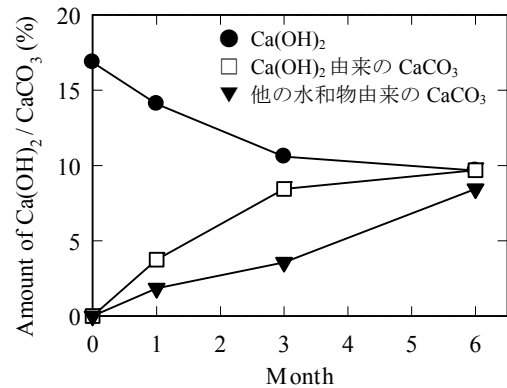


図-6 暴露期間による炭酸カルシウム量および水酸化カルシウム量の経時変化(沖縄)

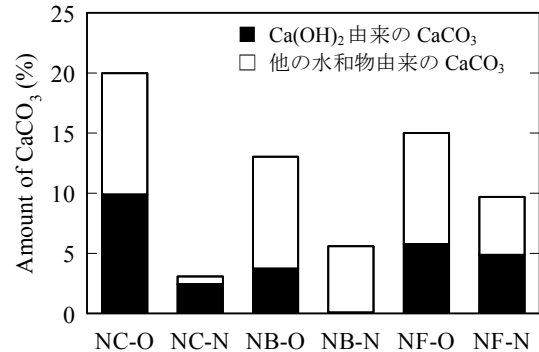


図-7 各暴露地点の炭酸カルシウム生成量 (O: 沖縄, N: 新潟)

潟NCにおける塩化物イオンの拡散係数が増加した要因は、炭酸化よりも乾燥の影響が大きいといえる。また、NBやNFについても、沖縄および新潟の暴露供試体では、炭酸カルシウムの大部分は水酸化カルシウム以外の水和物由来のものであり、C-S-Hの炭酸化による組織の多孔化によって拡散係数が大きく変化したと考えられる。

3.3 窒素吸着等温線

図-8に、一例として沖縄、新潟に暴露した供試体の窒素の吸着等温線を示す。暴露前後の窒素の吸着量を比較すると、暴露後の供試体は相対圧全域にわたり吸着量が減少し、吸着と脱着のヒステリシスも小さくなった。乾燥や炭酸化によって窒素の吸着量や比表面積は変化す

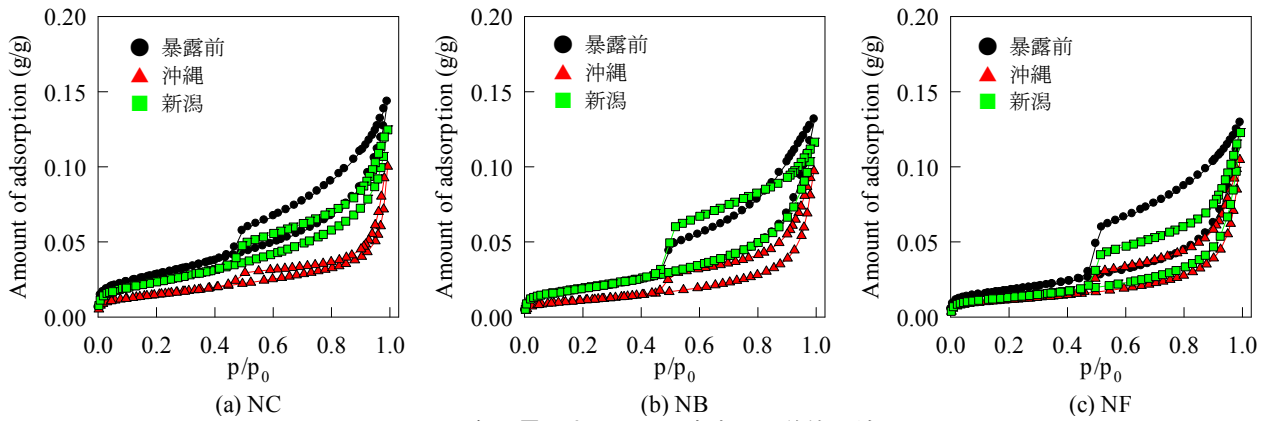


図-8 各暴露地点における窒素の吸着等温線

ることが明らかとなっており^{3), 8)}, これらは, 暴露によって乾燥や炭酸化が作用したものと考えられる。特に, 脱着等温線の $p/p_0=0.5$ 付近の急激な吸着量の変化も暴露によって小さくなった。セメント硬化体において, この急落量が多い場合, 5nm 以下の細かな空隙に拘束された 2nm~50nm のメソ空隙の体積が多く存在し, 乾燥によってメソ空隙の変化や C-S-H の凝集によって空隙が連結されると報告されている⁹⁾。したがって, 暴露による乾燥や炭酸化によって, 径の小さな空隙に拘束されていた空隙が開放または損失しているものと考えられる。

暴露地点の比較では, 新潟の暴露に比べ沖縄に暴露した供試体の吸着量はいずれの供試体とも減少し, ヒステリシスも小さくなった。暴露前の供試体について結合材の種類で比較すると, 相対圧全域での吸着量は, NC がもっとも多く, ヒステリシスや $p/p_0=0.5$ 付近の急激な変化量は混和材を使用した供試体ほど多くなった。したがって, 混和材を使用した硬化体では, 窒素がアクセスできない微小な空隙やアクセスできたとしても微小な径に拘束されている空隙が多く存在し, 複雑な構造を形成していると考えられる。また, 沖縄に暴露した NC では, ヒステリシスはほぼ損失しているが, NB や NF はヒステリシスを示しており, 混和材の置換によって環境作用を受けても複雑な構造を維持していることがわかる。

4. 考察

暴露供試体の炭酸カルシウム生成量および空隙構造の結果より, 実環境への暴露によって, セメント硬化体の物質移動性状に対して, 乾燥や炭酸化が影響していることが示唆された。本研究では, 酸素および塩化物イオンの拡散性状に対し, 空隙構造に関する指標をもとにシリーズ I, II の比較を行い, 乾燥と炭酸化がそれぞれの拡散性状に及ぼす影響の評価を試みた。

4.1 酸素の拡散係数に及ぼす空隙構造の影響

セメント硬化体中の物質の移動は, 空隙の量だけでなく空隙の連結性や屈曲性などの構造の影響を受ける。本

表-3 重回帰曲線の係数と相関係数

| 拡散種 | 空隙率: PV | 急落量: SD | 切片 | 相関係数 |
|-----------------|---------|---------|-------|------|
| | a | b | c | |
| O ₂ | 14.2 | -57.2 | -1.66 | 0.90 |
| Cl ⁻ | 9.63 | -32.6 | -0.77 | 0.70 |

研究では, 酸素の拡散係数の評価指標として空隙率 (PV: cm^3/cm^3) と空隙の連結性として窒素吸着等温線の脱着時の急落量 (SD: cm^3/cm^3) を用い, シリーズ I と II の酸素の拡散係数に対し重回帰分析を行った。なお, 酸素の拡散係数は自然対数で表記し線形回帰を行った。

表-3 に, 重回帰分析の結果より, 得られた各係数と相関係数を示す。重回帰分析により, 空隙率の係数は正となり, 急落量の係数 b は負となった。本研究では, 急落量を空隙の連結性を表す指標として扱っており, 急落量が多いことは不連続な空隙が多く存在することを示している。したがって, 係数 b が負を示したことは, 不連続な空隙の存在によって気体の移動が抑制されていることを表している。さらに, 相関係数が $R=0.90$ と高いことから, 暴露地点や環境作用の違いによらず酸素の拡散係数は, 空隙構造の影響が支配的であることがわかった。

4.2 塩化物イオンの拡散係数に及ぼす空隙構造の影響

表-3 に, 塩化物イオンの拡散係数に対し重回帰分析を行った各係数の結果を示す。また, 図-9 に, 塩化物イオンの拡散係数の実験値と重回帰の各係数により求めた計算値の関係を示す。表より, 各係数の正負の関係は酸素の拡散係数の結果と同様であるが, 相関係数 0.70 と酸素と比較し低くなった。これらに関して, 気体の移動は空隙構造の影響のみを受けるが, イオンの移動は空隙壁面の電気的な性質の影響を受けること⁶⁾, さらに本研究の塩化物イオンの拡散実験では, シリーズ I, II の供試体は乾燥の影響を受けた後, 再度, 吸水処理を行っており, 乾燥によって凝集した水和物が吸水処理によって再度分散し, その結果, 乾燥により粗大化した空隙の一部が乾燥前のもとの空隙構造へ回復していることも考えられる¹⁰⁾。また, 吸水処理によって必ずしも微小な空隙を含め

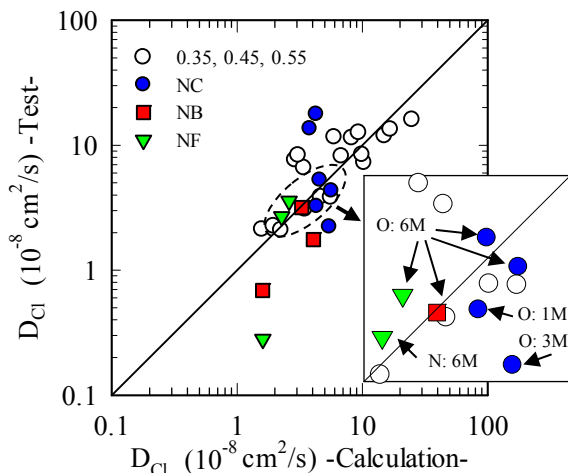


図-9 塩化物イオンの拡散係数の実験値と計算値
(O: 沖縄, N: 新潟 M: 暴露月数)

た全ての空隙が飽和されていることは本研究では明らかではなく、空隙の飽和度の違いによるイオンの移動性の変化も考えられる。一方で、図-9より沖縄や新潟に暴露し比較的炭酸化が進行した供試体（図中、点線部）において、実験値と計算値は同程度の傾向を示した。炭酸化が進行するとイオンの移動に対して空隙構造の影響が支配的になることも指摘されており⁹⁾、本研究結果は既往の報告と符合する。しかし、本研究の範囲内では炭酸化による相組成や空隙壁面の電気的性質の変化、さらには吸水による空隙構造の回復や飽和度などの影響を考慮できないため、今後の課題である。

5. まとめ

本研究では、自然環境下に暴露されたセメント硬化体の変質がイオンや気体の移動性状に及ぼす影響について、暴露の期間や地点の違いに着目し検討を行った。以下に本研究より得られた結果を示す。

- (1) 乾燥を受けることで塩化物イオンおよび酸素の拡散係数は増加した。一方で、実環境下に暴露された供試体では、暴露期間の進行とともに酸素の拡散係数は増加したが、普通ポルトランドセメントを使用した供試体では塩化物イオンの拡散係数は低下した。
- (2) 沖縄と新潟の暴露地点の違いによる塩化物イオンおよび酸素の拡散係数は、沖縄の環境において拡散係数の変化が大きく、炭酸化進行も大きくなった。
- (3) 暴露供試体の窒素の吸着等温線より、乾燥および炭酸化を受けることで、全相対圧における吸着量が減少し、 $p/p_0=0.5$ 付近の脱着時の急落量が減少した。
- (4) 乾燥や炭酸化の違いおよび暴露状況の違いによらず空隙量や空隙の連結性によって酸素の移動性状は支配される。一方で、イオンの移動は、空隙壁面の電気的性質や水分浸透による空隙構造の回復や飽和度の作用が影響していることが示唆された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、新潟大学の佐伯竜彦教授には暴露場を提供いただいた。なお、本研究は JSPS 科研費（課題番号：17K14709）の助成および日本コンクリート工学会 2018 年度研究助成を受けて実施された。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村暢, 濱幸雄, 谷口円: 乾燥によるモルタル直径 40~2000nm の細孔量変化と温度時間席の関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.713, pp.981-989, 2015.6
- 2) 志村雅仁, 岸利治, 鎌田和久: コンクリートへの塩分浸透に支配的な影響を与える停滞現象に関する実験的検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.478-483, 2015
- 3) 須田裕哉, 富山潤, 斎藤豪, 佐伯竜彦: 湿度変化による乾燥作用を受けたセメントペーストの空隙構造と塩化物イオンの関係に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.747-752, 2018.7
- 4) 品田健太, 佐伯竜彦: 混和材を用いたモルタルの塩化物イオン拡散性状と内部組織, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.697-702, 2005.7
- 5) 白川敏夫, 島添洋治, 麻生實, 永松静也: セメントペースト硬化体中の乾燥の程度と気体拡散係数の関係, 日本建築学会構造系論文集, No.524, pp.7-12, 1999.10
- 6) Ngala, V.T. and Page, C.L., Effects of Carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol.27, pp.995-1007, May 1997
- 7) Drouet, E. et al.: Carbonation of hardened cement pastes: Influence of temperature, Cement and Concrete Research, Vol.115, pp.445-459, 2019
- 8) Thomas, J.J., Heiseh, J., Jennings, H. M.: Effect of Carbonation on the Nitrogen BET Surface Area of Hardened Portland Cement Paste, Advanced Cement Based Materials, Vol.3, pp.76-80, 1996
- 9) 杉本裕紀, 栗原諒, Jiri Rymes, 丸山一平: 水和停止と前処理方法が吸着試験に及ぼす影響に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.427-432, 2017.7
- 10) Gajewicz, A.M. et al.: A ¹H NMR relaxometry investigation of gel-pore drying shrinkage in cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol.86, pp.12-19, 2016