

論文 吸水防止剤を塗布したポーラスコンクリートの力学的・化学的特性に関する研究

吉田 貴保*¹・川崎 佑磨*²・新 大軌*³・岡本 享久*⁴

要旨：本研究は、吸水防止剤を塗布したポーラスコンクリートの力学的・化学的特性について、使用環境として乾湿繰返し作用を受ける環境を模擬して検討を行った。対策として吸水防止剤を2種類選定し、無対策、気中養生のポーラスコンクリートと比較を行った。その結果、水中へ溶脱するカルシウム量には差が見られなかったが、水槽内に浮遊する白色析出物の析出量の減少とpHの低下に効果が見られた。さらに、圧縮強度と曲げ強度を測定したが、吸水防止剤の明確な効果は確認できなかった。また、気中養生と無対策のポーラスコンクリートにおいても強度増加は見られなかった。

キーワード：カルシウムイオン濃度、乾湿繰返し、吸水防止剤、炭酸カルシウム、ICP発光分析

1. はじめに

1990年代頃から、国内も含め世界的に環境問題への関心が高まり、コンクリート分野における環境負荷低減についても議論されるようになった。日本コンクリート工学会では、エココンクリート研究委員会が発足し、その中でエコマテリアルの一つとしてポーラスコンクリートが取り上げられている¹⁾²⁾。ポーラスコンクリートは、環境負荷低減および植物や生物などの生態系との調和も可能な材料として大きく期待されている。その後の2013年には、性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会(JCI-TC131A)が発足し、ポーラスコンクリートの研究動向について調査している³⁾。

ポーラスコンクリートは、細骨材を使用しない、もしくは使用量を極端に減らした多孔質なコンクリートである。そのため、通常のコンクリートとは異なった透水性を有しているが、コンクリートと比較して強度が低い。そのため、施工方法、透水性、強度に関連する研究が数多く行われてきた^{例えば4)~7)}。上述したように、ポーラスコンクリートの特性を発揮できる用途を考慮すると、必ず水分の影響が関わり、ほとんどの場合が水分の流入入により乾湿繰返し作用を受けることが考えられる。コンクリートは、水分の影響で耐久性などが著しく変化する特徴を有しており、連続した空隙を多く含んでいるポーラスコンクリートでは、その影響が顕著になる可能性も考えられる。このような背景を鑑みて、乾湿繰返し作用を受けるポーラスコンクリートについての研究が報告されているが、その数は非常に少ない^{例えば8),9)}。著者らは、乾湿繰返しを受けるポーラスコンクリートの化学的検討を

行い⁹⁾、水中にカルシウムが多量に溶脱すること、炭酸カルシウムが固体として大量に析出することが確認された。そこで本研究では、カルシウム溶脱および炭酸カルシウム析出量の減少を目的とした、新たに吸水防止剤を塗布したポーラスコンクリートを用意して、乾湿繰返しによる水中へのカルシウム溶脱量の変化について考察を行った。また、既往の研究では行っていなかったセメントペースト供試体と乾湿繰返しを行わない気中養生のポーラスコンクリートも用意して、乾湿繰返し作用がポーラスコンクリートに与える力学的・化学的特性について考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料と実験供試体

(1) 使用材料と配合

使用材料を表-1に、ポーラスコンクリートの配合を

表-1 使用材料と物性

材料	種類	成分・物性など
水	水道水	
セメント	普通ポルトランドセメント	密度：3.14g/cm ³
細骨材	三重県宮川産細骨材	表乾密度：2.62g/cm ³ 吸水率：2.02% 粗粒率：2.86
粗骨材	和歌山県橋本産6号碎石	絶乾密度：2.68g/cm ³ 吸水率：0.53%
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系

表-2 ポーラスコンクリートの配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
25	98	392	204	1485	3.92

*1 阪神高速技術(株) 技術部 (正会員)

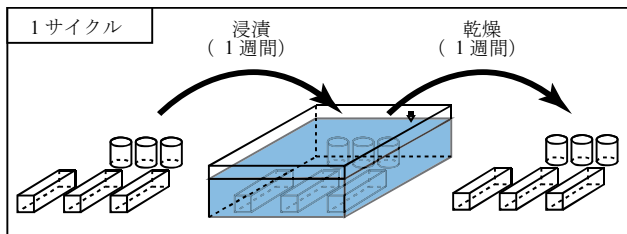
*2 立命館大学 理工学部都市システム工学科 准教授 工博 (正会員)

*3 島根大学大学院 総合理工学研究科 准教授 (正会員)

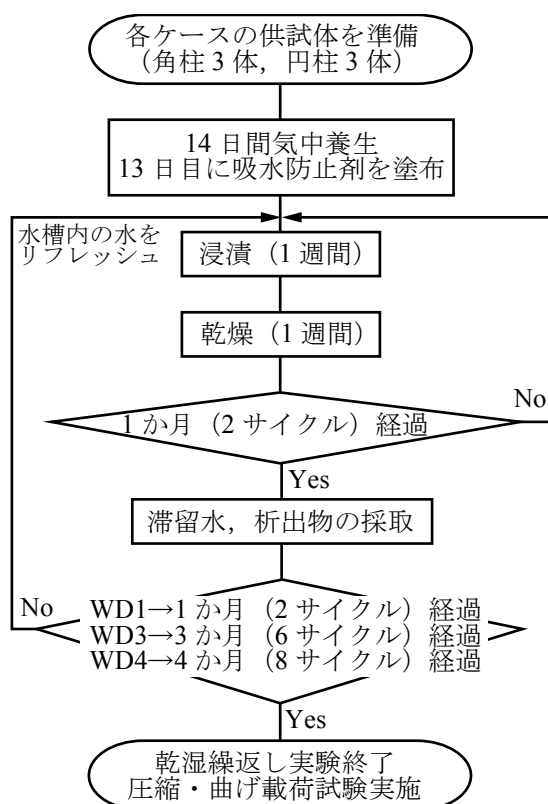
*4 立命館大学 理工学部環境システム工学科 特任教授 工博 (フェロー会員)

表－3 吸水防止剤の物性

記号	分類	有効成分量	性状	比重
S1	シラン・シロキサン系	記載なし	液体	0.80±0.05
S2	シラン・シロキサン系	80%	ペースト	0.9



図－1 乾湿繰返し実験の概要（1 サイクル）



図－2 本研究のフロー

表－2 に示す。設計空隙率は 15% とした。なお、セメントペースト供試体は、表－2 に示す配合と同様の水セメント比で作製した。

(2) 実験供試体

ポーラスコンクリートおよびセメントペースト供試体は、圧縮試験用供試体 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ と曲げ試験用供試体 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ を 3 体ずつ用意した。ここで、著者らの経験上、全ての供試体において人的・技術的な相違から設計した空隙率通りにポーラスコンクリート供試体を作製することが困難であると考えた。そこで本研究では、人的・技術的相違の影響を極力少なくして、設計空隙率を可能な限り保持するため、投入するポーラスコンクリ

CP - WD 0 - None
① ② ③ ④

- ① 供試体の種類 CP: セメントペースト
PoC: ポーラスコンクリート
② 養生方法 A: 気中養生
WD: 乾湿繰返し
③ 乾湿繰返し期間 (か月) 0, 1, 3, 4
④ 吸水防止剤 None: 吸水防止剤塗布無し
S1, S2: 吸水防止剤塗布有り

図－3 供試体ケース記号の概要

ートの量を、圧縮試験用型枠には 3410g、曲げ試験用型枠には 8670g に規定した。この作業により、各供試体の空隙率の誤差が少なくなるように工夫した。

(3) 打設と養生

セメントと細骨材を 100/ パン型ミキサー内に投入し、1 分間攪拌した後、水と混和剤の混合液を投入し、3 分 30 秒間攪拌した。その後、粗骨材を投入して 1 分 30 秒練り混ぜてポーラスコンクリートを作製した。各型枠へ規定量を投入した後、振動締固めを行った。打設後 24 時間後に脱型を行い、その後、温度 25℃、湿度 80% の環境下で 14 日間気中養生をした。

2.2 吸水防止剤の塗布と乾湿繰返し

本研究では、表－3 に示す吸水防止剤 2 種類を使用した。吸水防止剤は、気中養生 13 日目に塗布して 1 日間気中養生中に乾燥させた。塗布量は、2 種類とも 0.2kg/m^2 とした。各供試体全面に対して、規定量測定した吸水防止剤の残量が 0g になるまでローラーを用いて塗布を行った。

吸水防止剤の塗布および気中養生終了後に、浸漬 1 週間、乾燥 1 週間とした乾湿繰返し実験を行った。図－1 に 1 サイクルの概要図を、図－2 に実験のフローを、図－3 に供試体ケース記号の説明を示す。本研究では、乾湿繰返しを行う前の 0 ヶ月、乾湿繰返し 1 ヶ月 (2 サイクル)、3 ヶ月 (6 サイクル)、4 ヶ月 (8 サイクル) を対象とした。水槽内の水は 30kg に規定して、全ケースにおいて 1 ヶ月経過後に水を全て交換した。これは、実環境下において、滞留した水が 1 ヶ月程度で入れ替わることを想定したものである。その際には、滞留水および浮遊・沈殿している析出物の採取を行った。各規定期間終了後に、化学的分析および載荷試験を行った。

3. 測定方法

3.1 載荷試験

圧縮試験および曲げ試験ともに、載荷点および支点は平滑にするため、石膏・早強ポルトランドセメント・水を 2:1:1.5 で混練してキャッピングを行った。載荷面およ

び支点上に、骨材の突出部が存在する場合、その箇所荷重が集中して、強度にバラつきが出てしまうことを防ぐためである。

3.2 ICP 発光分析と pH 測定

ICP は Inductively Coupled Plasma の略称であり、誘導結合プラズマと呼ばれる。高周波で励起されたアルゴンガス的高温プラズマ炎の中に、試料溶液を噴霧し、発光するスペクトルの波長から元素の同定を行い、その強度で試料溶液の濃度を定量的に測定する装置である。様々な元素の分析が可能であり、試料を溶液化して測定するため、形状の制約がないのが特徴である。主に、金属材料の成分分析や無機材料、河川水などの成分分析に利用されている。装置の概略を図-4 に、使用した装置を写真-1 に示す。本研究では、ポーラスコンクリートの浸漬期間中に浸漬水内に溶脱した各種成分の分析を行った。分析した成分は、カルシウム、ケイ素、リン、マグネシウムである。セメントに含まれる元素を中心に選択した。リンを分析対象とした理由として、中らの研究¹⁰⁾によれば、セメント中に含まれるカルシウムの溶脱により水中のリンが低減される可能性も示唆されている。水質浄化を目的としたポーラスコンクリートの利用も近年増加しているため、リンの成分量の傾向について確認することにした。

pH メータを使用して、試料中の pH も測定した。乾湿繰返し 0 ヶ月の結果には、水道水の pH を使用した。通常、水道水は pH6~8 の弱酸性~弱アルカリ性（中性）の範囲内にあると考えられる。乾湿繰返しを行うことで、ポーラスコンクリート中のセメント成分からカルシウムが溶脱した場合、浸漬水の pH はアルカリ性を示すと推測した。使用した pH メータを写真-2 に示す。

ICP 発光分析および pH 測定のため、1 ヶ月毎に乾湿繰返し実験が終了した浸漬水を用いて、図-5 に示すように分析試料を作製した。まず、水槽内の浸漬水をよく攪拌して各種成分の濃度差がない状態にした。その後、浸漬水を採取して、浸漬水中に浮遊する析出物のろ過を行った。ろ過した試料を 10 倍希釈して、分析試料とした。なお、本研究で使用した水道水は、2 年連続で同様の分析結果を得たため、各主成分に大きな変動はないと考えて実験開始時のみ ICP 発光分析と pH の測定を行った。

4. 実験結果

4.1 ICP 発光分析

浸漬水中のカルシウム、ケイ素、リン、マグネシウムの含有量を分析した。なお、前述の通り、試料は 10 倍希釈されているため、分析結果（生データ）を 10 倍して評価した。ここで、この算出値は圧縮試験供試体 3 体と曲げ試験供試体 3 体から溶脱した各種元素含有量である。

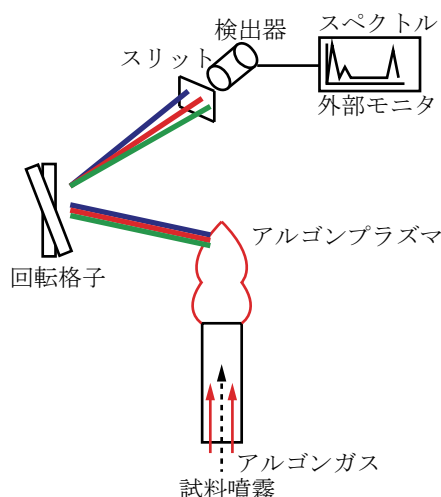


図-4 ICP 発光分析装置の概略



写真-1 本研究で使用した ICP 発光分析装置

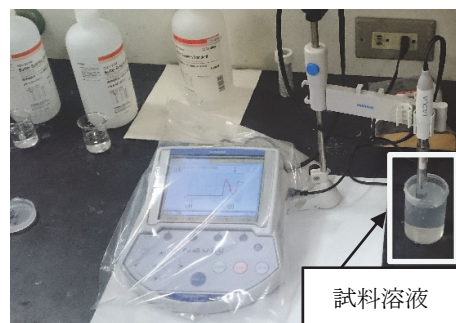


写真-2 使用した pH メータ

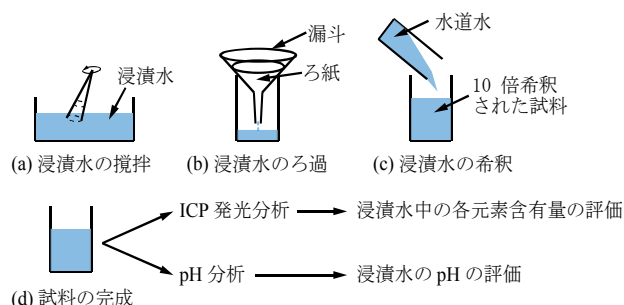


図-5 分析試料の作製フロー

ポーラスコンクリートでは、連続空隙と独立空隙の割合、空隙箇所など各供試体で異なると考えられ、単位容積あるいは単位面積あたりの元素含有量の算出は煩雑になる

と考えたためである。なお、乾湿繰返し実験開始時の各種元素含有量は、水道水の分析結果とした。

(1) ケイ素 (Si)

浸漬水中のケイ素含有量の挙動を図-6 に示す。この結果から、乾湿繰返し1ヶ月後に全ケースでケイ素の含有量が急増していることが確認できる。浸漬水への最大含有量は、PoC-WD4-None 供試体で約 70mg/l であった。この急増は、セメント成分の一つであるケイ素が溶脱した影響であると考えられる。その後、全ケースでケイ素含有量が減少し4ヶ月には全ケースで同等の値になった。ケイ素はセメント成分中に多く含まれており、かつ溶脱しやすい成分であると考えられる。

(2) マグネシウム (Mg)

浸漬水中のマグネシウム含有量の挙動を図-7 に示す。ケイ素と同様に、乾湿繰返し実験1ヶ月後にマグネシウム含有量が全ケースで急増しており、その後、マグネシウム含有量は4ヶ月まで変動しなかった。マグネシウムもセメント成分の一つであるため、多く溶脱したと考えられる。

(3) リン (P)

浸漬水中のリン含有量の挙動を図-8 に示す。リンは

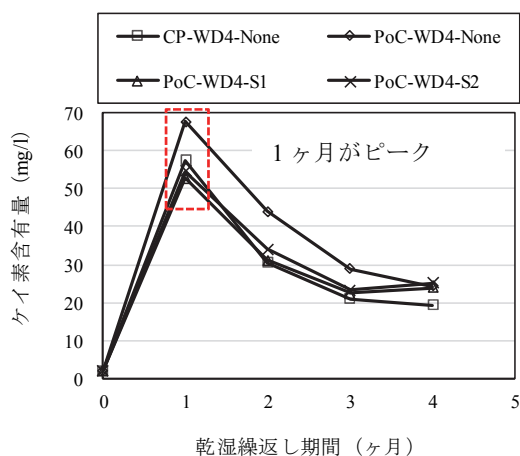


図-6 ケイ素の含有量

乾湿繰返し実験開始から4ヶ月まではほとんど変動しておらず、同等の値を示した。ポーラスコンクリートにおける水中のリン含有量の低減は、中らの成果¹⁰⁾でも報告されているが、水道水レベルのリン含有量には効果はなく、セメントにも微量しか含まれていないため、含有量も増加しなかった。希釈に用いた水道水は前述の通り、実験開始時のみしか分析していないため、希釈した水道水の微小な変動の影響を受けた可能性も考えられる。低減に効果のあるリンの濃度が存在すると考えられる。

(4) カルシウム (Ca)

浸漬水中のカルシウム含有量の挙動を図-9 に示す。カルシウム含有量もケイ素およびマグネシウム同様に、乾湿繰返し実験1ヶ月後に急増した。しかし、全ケースにおいてほぼ同等の値で変動しており、無対策のポーラスコンクリート供試体 (PoC-WD4-None) と吸水防止剤を塗布したポーラスコンクリート供試体 (PoC-WD4-S1 および PoC-WD4-S2) に明確な相違は確認されなかった。本実験では、1ヶ月毎に水槽内の水を入れ替えて新しくしているが、4ヶ月まで含有量に変化はなく2ヶ月以降は、毎月同量のカルシウムが水中へ溶脱したと考えられる。

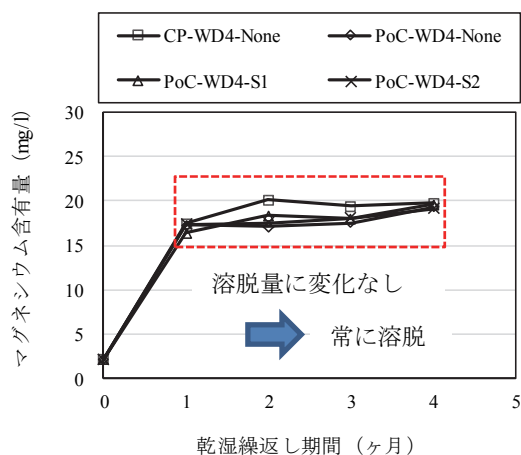


図-7 マグネシウムの含有量

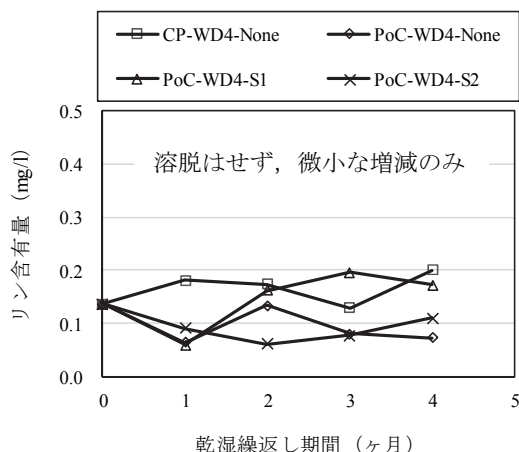


図-8 リンの含有量

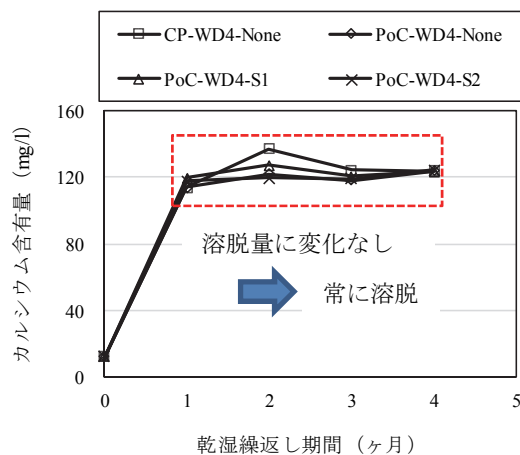


図-9 カルシウムの含有量

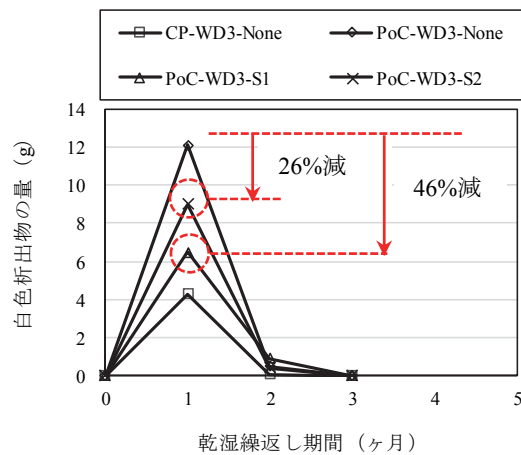


図-10 白色析出物の採取量

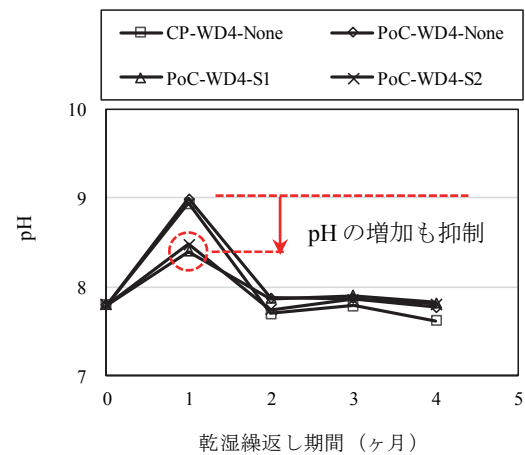


図-11 pHの測定結果

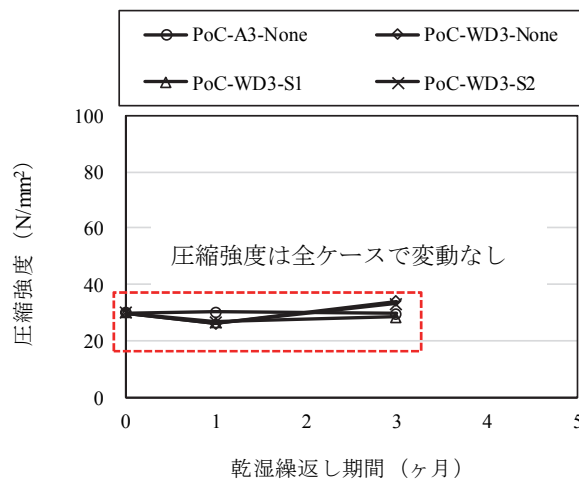


図-12 圧縮試験結果

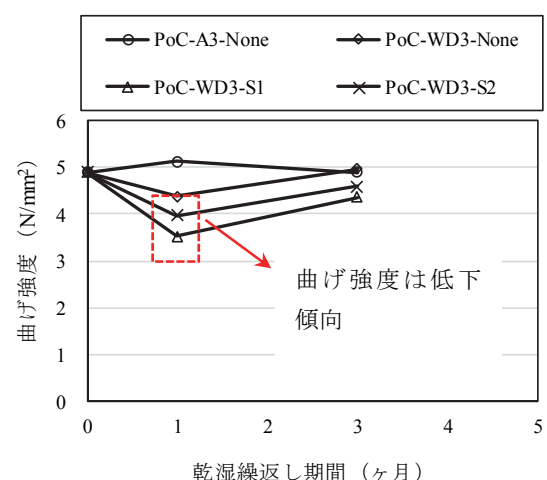


図-13 曲げ試験結果

また、乾湿繰返し1ヶ月後には、水槽中に多くの沈殿物が確認された。浮遊物質を可能な限り集積・採取して乾燥させた後、骨材などが入り込まないように、ふるいで粉末のみを採取して計量した。採取された析出物の量を図-10に示す。

析出物の主成分は、未反応のセメントから水中に溶脱した水酸化カルシウムと大気中の炭酸ガスが反応して生成される炭酸カルシウム（カルサイト）であると考えられる。この挙動を見てみると、吸水防止剤を塗布したPoC-WD3-S1供試体とPoC-WD3-S2供試体の水槽から採取した析出物量が、無対策のポーラスコンクリート供試体PoC-WD3-Noneよりも減少していることがわかる。著者らは、以上の結果を水中に空気からの炭酸ガスが溶解し、飽和溶解度を越えたカルシウム成分が炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムの固体になって析出したと推測した。また、2ヶ月以降は、採取量にほとんど相違は見られず0gに近い値となった。浸漬1ヶ月以内に溶脱したカルシウムは炭酸ガスが溶解することですぐに飽和溶解度を上回り白色析出物が生じたと推定される。この際、吸水防止剤無塗布のものは塗布したものと比較して析出物の量が多くなっており、溶脱したカルシウム量が異な

っているものと考えられる。また、1ヶ月以降は白色析出物がほとんど採取されず、液相中のカルシウムイオン濃度も一定である。この原因については明らかになっていないが、これらの結果は、乾湿繰返し期間や浸漬水入れ替えのタイミングなどにも影響されることが考えられる。また、後述する圧縮および曲げ強度の著しい低下を引き起こすほどの析出ではないと考えられる。

4.2 pH

pHメータによる各試料のpHの挙動を図-11に示す。実験開始時のpHは7.80で水道水のpHとして問題のない値を示している。乾湿繰返し実験1ヶ月後には、pHが増加してアルカリ性を示していることが分かる。これは、カルシウムの溶脱に伴い、急激にアルカリ性に変化した影響が考えられる。2ヶ月目の急激なpHの低下は、水中のカルシウムが空気中の二酸化炭素と反応して炭酸カルシウム（カルサイト）になって析出し、水中のpH値が減少したためであると考えられる。その後は、図-9に示すように水中のカルシウム含有量は高い値であるが、pHが実験開始時の水道水レベルに収束した。この点に関しては未解決であるため、今後さらなる化学的検討を行う。

4.3 圧縮試験と曲げ試験

圧縮試験結果を図-12に示す。ポーラスコンクリート供試体では、圧縮強度に大きな変動はなく、乾湿繰返し実験開始前から3ヶ月まで同等の値が確認できる。セメントペースト供試体は、乾湿繰返し1ヶ月後に一時的な強度の低下が見られたが、この理由については現在調査中である。載荷時における人的誤差、化学的な知見から炭酸カルシウムと考えられる白色物質の析出も確認できていることから、それらに関連した変動の可能性も考えられる。今後、乾湿繰返し実験および載荷試験が終了した同供試体のセメントペーストを切り出して、SEM（走査型電子顕微鏡）を用いた観察を行う予定である。この観察により、セメントペーストの状況を確認し乾湿繰返しを受けてカルシウムが溶脱することでセメントペーストが疎になるか確認することが可能であると考えている。

曲げ試験結果を図-13に示す。気中養生をしたPoC-A3-None 供試体は1ヶ月後の曲げ強度は増加しているが、乾湿繰返しを行ったポーラスコンクリート供試体は、1ヶ月後の曲げ強度が低下した。その中でも、吸水防止剤を塗布したPoC-WD3-S1 供試体とPoC-WD3-S2 供試体の曲げ強度が、無対策のPoC-WD3-None 供試体よりも多少低い結果となった。すなわち、力学的特性においては、吸水防止剤の明確な効果については確認できなかった。このように、ポーラスコンクリートが乾湿繰返し環境の影響を受けることで、曲げ強度が低くなる可能性が示された。ただし、図-13には確認しやすいように平均値のみをプロットしており、各ケースの結果の相違が明確には確認されていないことから、3体のバラつきが影響している可能性も考えられる。

5. まとめ

本研究で明らかになった点を以下に挙げる。

- (1) 乾湿繰返し直後の1ヶ月は、水中のカルシウム濃度が急増し溶脱したカルシウムが炭酸ガスと反応して白色析出物として固化・析出することが確認できた。
- (2) 吸水防止剤を塗布した供試体から確認された白色析出物の量は、無対策のそれと比較して25～50%程度減少した。すなわち、析出物の抑制に吸水防止剤の効果が寄与したと考えられる。
- (3) 圧縮強度では、全てのケースでほとんど強度の変化は確認されなかった。一方、曲げ強度では、乾湿繰返しを受けると一時的に強度が低下することが確認された。したがって、曲げ強度においては、吸水防止剤の効果は確認できなかった。

今後、乾湿繰返し5ヶ月の載荷および各種測定、白色析出物の化学分析(X-RD)、セメントペーストのSEMによる観察を進めていく予定である。

謝辞

本研究の実験に終始御協力頂いた、仲晃弘氏（立命館大学4回生）に感謝致します。また、化学的分析を御指導頂いた、滋賀県工業技術総合センター機能材料担当の中島孝氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 玉井元治, 水口浩之, 出村克宜, 岡本享久: エココンクリート研究委員会報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.19-28, 1996
- 2) (社)日本コンクリート工学協会: エココンクリート研究委員会報告書(自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望), pp.1-78, 1995
- 3) (社)日本コンクリート工学協会: 性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会(JCI-TC131A)報告書, 2015
- 4) 岡本享久, 安田登, 増井直樹, 佐藤文則: ポーラスコンクリートの製造・物性・試験方法(エココンクリート), コンクリート工学, Vol.36, No.3, pp.52-62, 1994
- 5) 玉井元治: コンクリートの高性能・高機能化(透水性コンクリート), コンクリート工学, Vol.32, No.7, pp.134-138, 1998
- 6) 安藤貴宏, 栗原哲彦, 内田裕市, 六郷恵哲: ポーラスコンクリートの曲げ破壊性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.765-770, 1995
- 7) 小椋伸司, 国枝稔, 栗原哲彦, 六郷恵哲: ポーラスコンクリートの強度改善, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.499-504, 1997
- 8) 本田陵二, 水口浩之, 西川浩史, 石丸啓輔: ポーラスコンクリートの乾湿繰返し抵抗性に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1421-1426, 2006
- 9) 川崎佑磨, 新大軌, 吉田貴保, 岡本享久: 乾湿繰返しを受けるポーラスコンクリートの化学的分析に基づく基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1737-1742, 2016
- 10) 中新弥, 谷貝有紀, 安部良介, 岡本享久: 球形ポーラスコンクリートによる窒素・リンの低減効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1339-1344, 2015