論文　浸透性吸水防止材で被覆したポーラスコンクリートの品質改善

吉田　知弘[*1]・国枝　稔[*2]・小澤　淳[*3]・六郷　恵哲[*4]

要旨：乾湿の激しい環境下での劣化が懸念されているポーラスコンクリートに対して，2 種類の浸透性吸水防止材で被覆することにより乾湿繰返しに対する抵抗性（水分の急激な吸水および排水により生じる劣化に対する抵抗性）を向上させたポーラスコンクリートの開発を目的とし，実験的な検討を行った。その結果，特に被膜タイプの吸水防止材を用いた場合に，乾湿繰り返しに対する抵抗性は向上すること，吸水防止材の劣化が乾湿繰り返し抵抗性の低下に深く関係していることを明らかにした。

キーワード：ポーラスコンクリート，浸透性吸水防止材，乾湿繰り返し，動弾性係数

1. はじめに

ポーラスコンクリートは，粗骨材間に少量のセメントペーストをバインダーとして構成させるオコシ状のコンクリートであり，物性や適用性等これまでに多くの研究が行われてきた[1)]。一方，ポーラスコンクリートの耐久性については明らかになっていない部分も多く，特に乾湿繰返しによる劣化（水分の急激な吸水および排水により生じる劣化に対する抵抗性）が懸念されており，実験室レベルでは経時的に劣化する事例が報告されている。なお，ポーラスコンクリートの耐久性低下に関する特徴には例えば以下の点が挙げられる。

- コンクリート内部に連続的な空隙を持つため，水に接する部分が多く，表層面で吸排水が急速に行われる。よって，乾湿や凍結融解の激しい環境下では，ペーストの劣化を早める可能性がある。
- 薄層のセメントペースト（骨材間）に力学性能が依存するため，ペーストのわずかな劣化が，材料劣化として顕在化する。

ポーラスコンクリートを長期的に供用するためにも，劣化メカニズムを定量化し，さらには耐久性を向上させることが期待される。ポーラスコンクリートの耐久性を向上させる方法の 1 つに，セメントペースト量（モルタル量）を増加させ，強度を上げることが考えられる。しかし，所定の空隙率が確保できないことが懸念されるため，空隙率や骨材寸法を変えずに，透水性や耐久性を向上させることが望ましい。

本研究では，セメントペースト内に浸透し，内部組織を改質し，かつ水分の浸透を防ぐ機能を有する浸透性吸水防止材を用いて，ポーラスコンクリートの乾湿繰返しに対する抵抗性を向上させることを目的とした基礎実験を実施した。

表－１　浸透性吸水防止材の概要

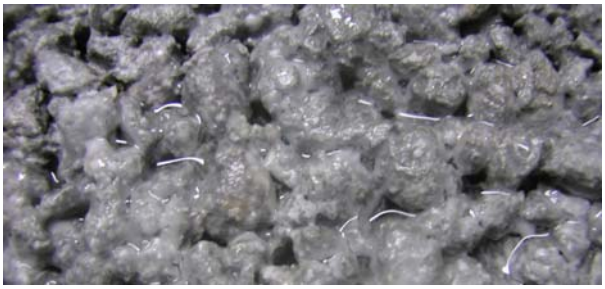
種類	タイプ	主成分	含有量(%)	pH	密度(g/m^3)	液色	防水形態
吸水防止材1	水性	シリカを含むアクリル酸エステル	50	8.5	1.17	乳白色	造膜
吸水防止材2	水性	アルキルアルコキシシランモノマー	40	8	0.95	無色	疎水化

*1 岐阜大学　大学院工学研究科土木工学専攻　（正会員）
*2 名古屋大学　大学院工学研究科社会基盤工学専攻助教授　博士（工）　（正会員）
*3 岐阜大学　工学部土木工学科
*4 岐阜大学　工学部社会基盤工学科教授　工博　（正会員）

表－２　各種コンクリートの示方配合表

コンクリートの種類	粗骨材寸法 (mm)	目標空隙率 (%)	W/C (%)	p/g*1 (%)	単位量（kg/m³）				
					W	C*2	S	G	Ａｄ
POC大（骨材径大）	13 - 20	20.2	30	30	89.1	296.9	—	1609	—
POC小（骨材径小）	5 - 13	20.8	30	30	88.3	294.4	—	1583	—
普通CONC	5 - 13	-	62.8	-	184	293	722*3	1035	1.17*4

*1　p/g（ペースト粗骨材比）　　*2　早強ポルトランドセメント
*3　細骨材（川砂）　　*4　AE剤



POC1

POC2

写真－１　浸透性吸水防止材を被覆したポーラスコンクリート

2. 実験概要

2. 1 浸透性吸水防止材および使用材料

浸透性吸水防止材の概要を**表－1** に示す。本実験では市販されている 2 種類の浸透性吸水防止材（以後，吸水防止材 1，吸水防止材 2 と称す）を使用した。吸水防止材 1 は，主成分であるコロイダルシリカ微粒子が遊離アルカリと反応して，コンクリート表面の空隙を充填することで緻密化し，アクリルウレタン樹脂が撥水性のある防水被膜を形成する。吸水防止材 2 はアルキルアルコキシシランが加水分解および脱水縮合反応を起こし，生成したアルキルシロキサンポリマーにより基材を疎水化する。吸水防止材 1 とは異なり表面に塗膜を形成しないため，外観の変化は見られないが，圧力下での透水に対する抵抗性は乏しい。どちらの吸水防止材も水性であり，透湿性にも優れる特性を持つ材料である。

表－２に，本実験で用いた骨材径の異なる 2 種類のポーラスコンクリート及び比較用の普通コンクリートの配合を示す。いずれの配合においても，セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。粗骨材には，粒径 13-20mm の骨材（密度 : 2.61g/cm³, 実績率 61.4%）及び, 5-13mm の径の骨材（密度 : 2.61g/cm³，実績率 60.9%）の 2 種類を使用した。以後，それぞれの骨材を用いたポーラスコンクリートを POC 大, および POC 小と称す。

2. 2 作製方法

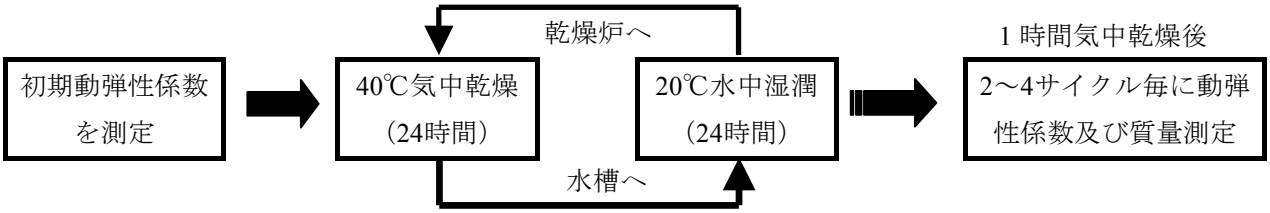
容量 100 リットルの強制練パン型ミキサーに，あらかじめ表乾状態に調整しておいた骨材など，水以外の材料を全て投入し十分攪拌した後，水を投入し練り混ぜる空練り方式とした。試料は所定の型枠に 2 層に分けて詰め，各層ごとに突き棒（突き部分が 35×35mm）にて十分に締め固めを行った。

すべての供試体は，打設後 2 日にて脱型し，20℃の恒温室内にて湿布養生を行った。その後，材齢 14 日にて気中乾燥を 1 日行い, 吸水防止材で被覆した。被覆後は, 屋外で 2 日間乾燥させ，恒温室内にて 12 日間の気中養生を行った。次節にて説明する各種物性試験は，すべて材齢 29 日で行った。

表－３　物性試験結果

コンクリートの種類	空隙率*1 (%)	標準偏差	透水係数*2 (cm/s)	標準偏差	圧縮強度*2 (MPa)	標準偏差	曲げ強度*1 (MPa)	標準偏差	静弾性係数*2 (GPa)	標準偏差	動弾性係数*1 (GPa)	標準偏差
POC1小	13.7	4.2	1.1	0.3	8.0	0.9	2.3	0.4	13.2	3.6	21.2	4.3
POC2小	19.6	3.2	3.7	0.5	8.6	1.4	2.3	0.4	12.5	1.2	20.4	3.0
POC0小	22.3	3.2	2.8	0.3	8.7	0.6	2.2	0.3	12.2	3.6	19.4	3.6
POC1大	26.3	1.8	4.9	0.7	8.9	1.2	1.3	0.2	11.9	2.3	14.6	1.3
POC2大	27.8	1.2	5.8	1.2	6.1	3.6	1.5	0.2	10.0	2.7	13.2	2.1
POC0大	29.3	2.4	6.1	0.3	6.9	1.8	1.8	0.3	12.2	1.5	13.5	1.8
普通CONC	-	-	-	-	32.0	2.8	4.2	0.3	25.2	1.6	32.1	0.5

*1　角柱供試体（100×100×400mm）　　*2　円柱供試体（φ100×200mm）



図－１　乾湿繰り返し試験フロー

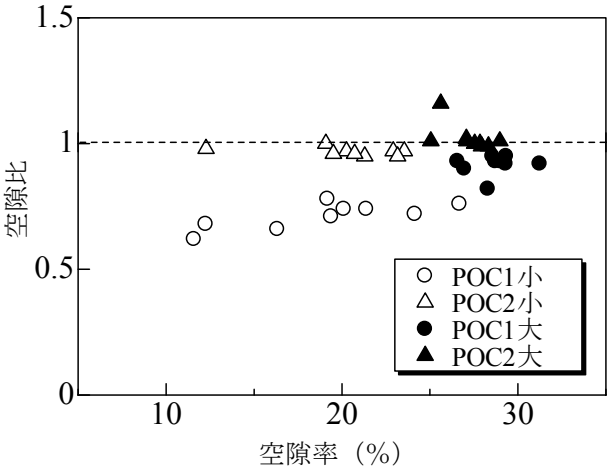
吸水防止材による被覆は，円柱供試体（φ100×200mm）及び角柱供試体（100×100×400mm）が完全に浸漬できるボックスを用意し，吸水防止材をそれぞれ溜め，供試体を溶液中に浸漬させる方法とした。その際，コンクリート内部にまで吸水防止材が行き渡るよう，浸漬中に供試体を反転させ，十分に空気を取り除いた。以後，吸水防止材 1, 2 でそれぞれ被覆したポーラスコンクリートを POC1, POC2,無被覆ポーラスコンクリートを POC0 と称し，外観を**写真－１**に示す。

2. 3 物性に関する検討

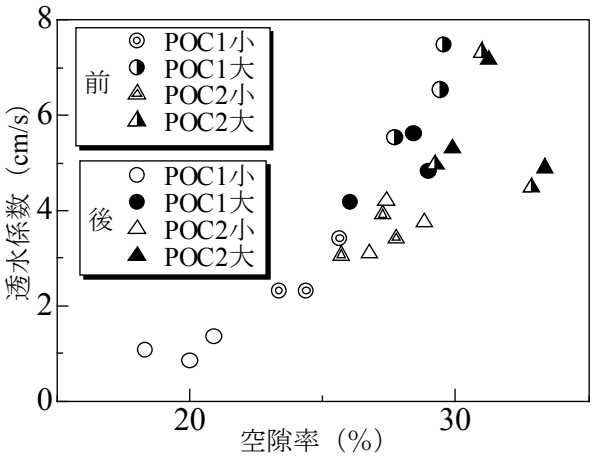
本実験では，空隙率，透水係数および強度等の力学特性を求める試験を行った。空隙率と透水係数については，JCI エココンクリート研究委員会が提案している「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）」の容積法，「ポーラスコンクリートの透水試験方法（案）」に準じて行った。空隙率，透水係数を計測後に，圧縮強度，曲げ強度，静弾性係数，動弾性係数も併せて測定した。なお，供試体寸法は，φ100×200mm の円柱供試体で空隙率，透水係数，圧縮強度，静弾性係数を，100×100×400mm の角柱供試体で，空隙率，曲げ強度，動弾性係数を測定した。

2. 4 乾湿繰り返し試験

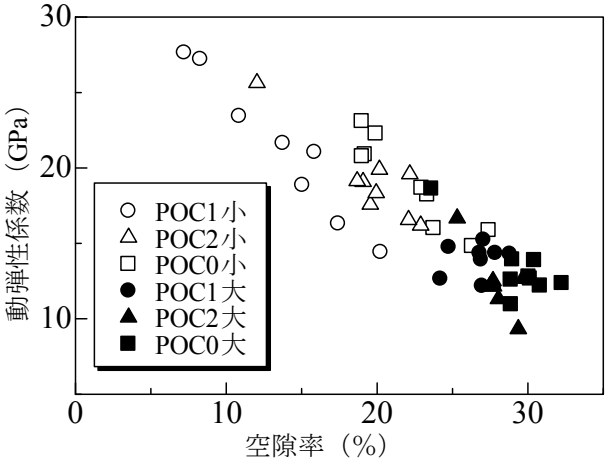
試験方法を**図－１**に示す。材齢 29 日経過後，100×100×400mm の各種コンクリート供試体（各 3 体）を，先ず乾燥炉（40℃）に 24 時間置いて乾燥状態にし，次に 20℃の恒温室内の水中（水温は約 17℃）に 24 時間浸漬して湿潤状態にする。この操作を乾湿繰返し 1 サイクルとし，2～4 サイクル毎に動弾性係数及び質量を測定する。なお，測定は湿潤工程直後に行うこととし，水中から取り出した後，約 1 時間，気中で内部の水抜きを行い，その後，表面の水をふき取り速やかに測定した。また，試験条件は供試体を作製する際に，熱電対を供試体中心部に埋設し，温度履歴を計測することで一定とした。評価項目は相対動弾性係数，質量減少率およびマイクロスコープによる表面観察の 3 項目とした。



図－２　空隙率と被覆後の空隙比



図－３　空隙率と透水係数の関係



図－４　空隙率と動弾性係数の関係

3. 実験結果および考察

3. 1 物性試験結果

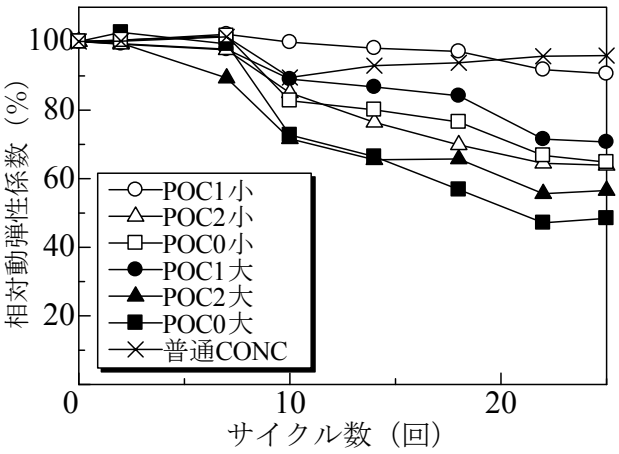
今回作製したポーラスコンクリートの物性試験結果を**表－３**に示す。ただし，各データはそれぞれの平均値とした。

（1）強度

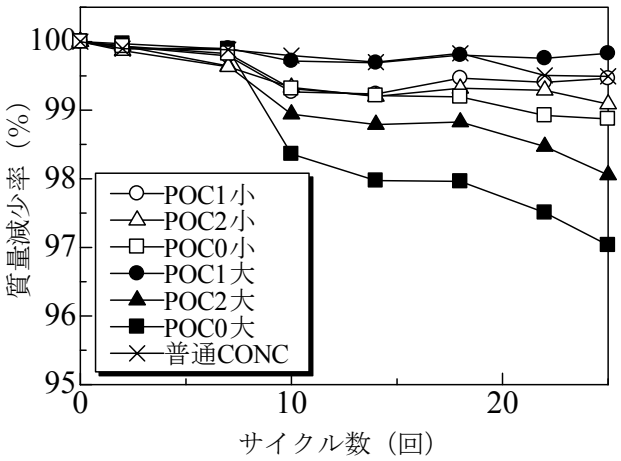
表－３の結果から，吸水防止材による被覆が圧縮強度，曲げ強度に及ぼす影響は小さい。POC1 大では，圧縮強度はシリーズ中最も大きいが，曲げ強度は最も小さくなっているなど，ばらつきが原因と推察されるデータが見受けられる。吸水防止材が供試体表面の硬度を上げ，微細なひび割れ等の発生を低減することで圧縮，曲げ強度ともに向上させることを期待したが，全体の傾向としては，本実験ではその効果はほとんど確認されなかった。

（2）空隙率

図－２に，吸水防止材での被覆による空隙率の変化を，被覆前の空隙率に対する被覆後の空隙の比（空隙比）で示した。POC2 供試体では，被覆による空隙率の変動は見られないが，POC1 供試体においては，供試体の空隙率が低いほど，被覆後の空隙比が低下する傾向を示した。特に，空隙率が 15%程度の供試体では，被覆後の空隙比が半減（空隙率約 8%）しており，空隙率が大幅に下がったことを示している。これは，アクリルウレタン樹脂が厚みのある防水被膜を表面に形成したため，吸水防止材の付着量が見かけの空隙率を低下させたと考えられる。また，それは骨材径の小さなポーラスコンクリートで顕著であり，連続空隙の細分化により吸水防止材の付着面積が拡大したことが影響を及ぼしていると推測される。さらに，供試体表面を観察すると，所々で吸水防止材による目詰まりも確認された。既往の研究結果においては，5-13mm の砕石を使用したポーラスコンクリートの空隙径は約 3mm と示されており，吸水防止材が空隙に充填された可能性も考えられる。以上より，被膜タイプの吸水防止材をポーラスコンクリートに適用する場合，空隙径が空隙率に与える影響は大きく，比較的大きな骨材での利用が求められる。本研究の範囲内では骨材径が 13-20mm，空隙率が約 30%程度のポーラスコンクリートにおいて望ましい結果となった。



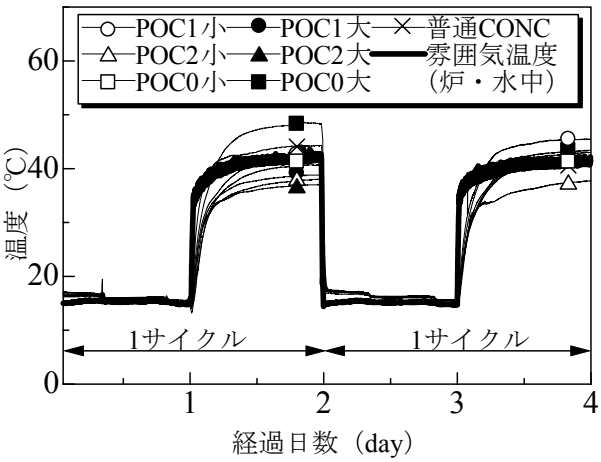
図－６　乾湿繰り返しによる相対動弾性係数



図－７　乾湿繰り返しによる質量減少

0 サイクル　　13 サイクル　　25 サイクル

写真－２　乾湿繰り返しによる表面劣化（倍率 25 倍）



図－５　温度の経時変化

（3）透水係数

図－３に吸水防止材の被覆による空隙率と透水係数の関係を示す。POC1 供試体では，吸水防止材の被覆による空隙率の低下に伴い，透水係数も低下する傾向を示した。これは，吸水防止材が連続空隙（透水に関わる空隙）に被膜することで，その膜厚が空隙径を小さくしたり，連続空隙を閉塞させ独立空隙や半独立空隙（透水に関係の無い空隙）に変えたことによると推察される。一方，POC2 供試体では，被覆後の透水係数に変化は現れていない。また，どの供試体も空隙率が高くなるにつれて透水係数は比例的に大きくなり，被覆後においても，空隙率と透水係数の間には相関性が維持されていた。

（4）動弾性係数

図－４に空隙率と動弾性係数の関係を示す。

寸法の異なる 2 種類の骨材を用いた場合でも，空隙率の増加に伴い動弾性係数は低下し，空隙率と動弾性係数の間には高い相関性が認められた。前述のとおり，空隙率と圧縮強度には高い相関性があったことからも，通常のコンクリートと同様にポーラスコンクリートにおいても，空隙率と動弾性係数の間には，良い相関性が存在している。

3．2 乾湿繰返し試験結果

（1）供試体内部の温度変化

図－５に，乾湿繰返し試験において，熱電対による供試体内部の温度と外部の温度変化の経時変化を示す。いずれの供試体においても，平

衡温度になるまでに，加熱時には 12 時間程度，冷却時には 6 時間程度必要であった。さらに，乾燥炉の容量が小さいために，局所的な温度の差が見受けられる場合もあった。よって，本実験では，各供試体が同一の場所に配置されないように配慮することとした。

(2) 相対動弾性係数，質量減少率

乾湿繰り返しによる相対動弾性係数，質量減少率とサイクル数の関係をそれぞれ**図－６，７**に示す。また，POC1 供試体の表層を**写真－２**に示す。

サイクル数 25 回において，POC2 供試体および POC0 供試体では，動弾性係数が 60%まで低下した。それに比べ，POC1 供試体では動弾性係数および質量減少率ともにわずかに低下する程度であった。POC2 供試体では，吸水防止性能としてシリコーンが水の浸透とともにセメントペースト内部へ浸透し，表面に撥水層が形成される。しかしながら，本実験で使用したポーラスコンクリートは水セメント比 30%と緻密なマトリックスであることから，内部への浸透が少なく液ダレや揮発を起こした可能性[2)]が考えられ，POC0 供試体と同程度の乾湿繰り返しに対する抵抗性を示したと予想される。POC1 供試体においては，アクリルウレタン樹脂の層が水分の吸収を抑制したものと考えられる。ただし，POC1 供試体の表層部では，試験開始直後から，約 13 サイクルにかけては，表面に微細なひび割れが発生するに留まっているが，その後，終了 25 サイクルにかけて，頻繁に吸水防止材の剥離が生じていた。これは，動弾性係数の低下と関係深く，吸水防止材の劣化（比較的大きなひび割れの発生）が乾湿繰り返しに対する抵抗性の低下を促進したものと推察される。以上より，動弾性係数の低下により評価されると考えられる乾湿繰返しによるポーラスコンクリートの劣化のメカニズムとして，セメントペースト表面での微細なひび割れの発生，およびそれに起因して生じた供試体表面近傍の骨材の欠落ち（質量減少で表される）が考えられる。また，乾湿繰り返しに対する抵抗性の向上には被膜タイプの吸水防止材が有効であるが，その場合は，吸水防止材の劣化が耐久性の低下に深く関係していると予想される。

4. おわりに

本研究にて得られた結論を以下に示す。

1) 吸水防止材が，ポーラスコンクリートの各種力学特性に与える影響は小さく，吸水防止材の種類によっては，空隙率及び透水係数が低下する傾向を示した。
2) ポーラスコンクリート供試体内に熱電対を配置し，供試体内部の温度変化を計測した結果，本研究では所定の温度に到達するまでに時間差が生じた。乾燥炉を用いた乾湿繰返し試験においては，その容量によっては局所的な温度のばらつきが認められる場合があるため，供試体の配置等には注意する必要があった。供試体内部の昇温速度や表面と内部の温度差などが劣化に及ぼす影響等についても引き続き検討が必要である。
3) 本実験の条件においては，内部に含浸し表層を改質する吸水防止材（吸水防止材 2）で被覆したポーラスコンクリートでは，乾湿繰返しに対する抵抗性の改善効果は少なく，緻密なポーラスコンクリートのマトリックスに，当該材料が十分に浸透していない可能性が考えられる。逆に，被膜タイプの吸水防止材（吸水防止材 1）が効果的であり，その場合は，吸水防止材の劣化がポーラスコンクリートの耐久性の低下に深く関係していると予想される。

参考文献

1) コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書，pp.65-70，2003
2) 林大介　他：シラン・シロキサン系撥水材の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，pp.301-306，2000