

論文 乾燥に伴う水分の逸散と空隙構造の変化がセメント硬化体への液状水浸透性状に及ぼす影響

鎌田 知久*1・岸 利治*2

要旨：乾燥による水分の逸散や空隙構造の変化がセメント硬化体への液状水浸透性状に及ぼす影響を理解するため、モルタル供試体に対して異なる温度条件で乾燥を与え、空隙構造分析や液状水浸せき試験を行った。乾燥温度の上昇に伴い、水分の逸散量、総空隙量、連続空隙量の増加及び閾細孔径の粗大化が確認され、液状水の浸透深さも同様の傾向を示した。乾燥による液状水浸透性状の変化と水分の逸散量の間に明確な対応関係は見られなかったが、空隙構造の指標である総空隙量、連続空隙量及び閾細孔径との対応は良好であった。このため、乾燥による液状水浸透性状の変化は空隙構造の変化に強く依存していることが示唆された。

キーワード：乾燥、水分逸散、空隙構造、連続空隙量、閾細孔径、液状水浸透性状

1. はじめに

コンクリート構造物の各種劣化現象やそれに伴う鋼材腐食には、水の浸透が大きく関与している¹⁾。2017年度に制定されたコンクリート標準示方書〔設計編〕²⁾では、中性化と水の浸透に関する照査が新たに導入され、液状水の浸透を陽に考慮することが可能になった。

液状水の浸透性状はコンクリートの品質に強く依存する³⁾ため、設計や施工が極めて重要となる。近年では、山口県のひび割れ制御システム⁴⁾や東北の復興道路の品質確保システム⁵⁾の構築など、新設コンクリートの表層品質や耐久性の向上を目指した試みが精力的に行われている。一方で、コンクリート構造物は数十年から百年オーダーで供用されるため、経時的な品質の変化の理解が極めて重要となる。特に、乾燥や乾湿繰り返しによる含水状態や空隙組織の変化は、コンクリートの品質に強く影響するため⁶⁾、液状水の浸透を適切に、かつ長期的に評価するには、経時的な品質の変化と液状水の浸透性状の関係を理解する必要がある。そこで本研究では、乾燥による品質の変化に着目し、異なる配合で作製したセメント硬化体に対して複数の温度条件で乾燥を与えた後に液状水への浸せき試験を実施することで、水分の逸散や空隙構造の変化が液状水の浸透性状に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体作製及び乾燥条件

本研究で作製したモルタル供試体の配合を表-1に示す。s/cは3.0に統一し、普通ポルトランドセメント(C)を用いたN55、高炉スラグ微粉末(BFS)を50%置換したB55、フライアッシュ(FA)を20%置換したF55の計3配合でφ50×100mmのモルタル円柱供試体を作製した。

表-1 モルタルの配合

配合	W/B (%)	s/c	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	BFS・FA	S
N55	55	3.0	275	500	—	1501
B55			273	249	249	1491
F55			271	395	99	1480

C:3.15kg/m³, BFS:2.91kg/m³, FA:2.21kg/m³, S:2.65kg/m³

打設後は、まず型枠表面をポリエチレンラップで覆った状態で28日間の封緘養生を与え、その後供試体を脱枠し、室温20℃、相対湿度(RH)60%の環境下で3か月の気中養生を与えた。養生後は、浸せき面(打設底面)以外の面をアルミニウムテープでシールした状態で、20℃の実験室(RH60%)、40℃の恒温槽(RH35%)、60℃の恒温槽(RH10%)及び105℃の乾燥炉内で7日間の乾燥を与えた。乾燥後に浸せき面の反対面のアルミニウムテープを除去した。

2.2 実験・分析方法

(1) 重量測定

乾燥による水分の逸散量及び液状水浸せき試験後の吸水量を把握するため、1/100g単位で重量を測定可能な電子天秤を用いて乾燥前後や浸せき前後の供試体重量を測定した。

(2) 空隙構造分析

乾燥による空隙構造の変化を把握するため、水銀圧入法による空隙構造分析を実施した。7日間乾燥させた供試体の表層10mmから、粉碎加工した5mm角の試料を約2g採取した。採取した試料は、24時間以上アセトンに浸せきさせた後、D-dry法により24時間真空乾燥させた。本分析では測定最小径を10nmとし、測定で得られ

*1 東京大学 生産技術研究所 特任助教 博(工) (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 教授 博(工) (正会員)



図-1 液状水浸せき試験の試験風景と概略図

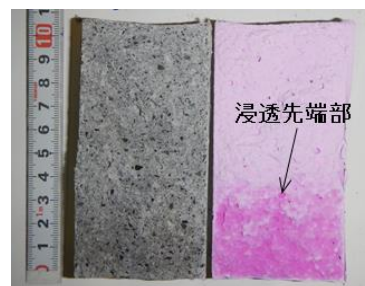
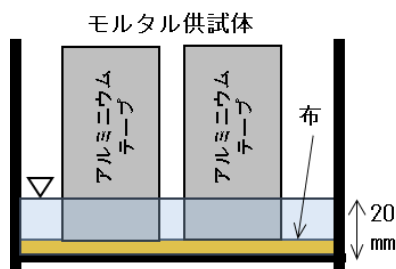


図-2 現像剤噴霧後の割裂面

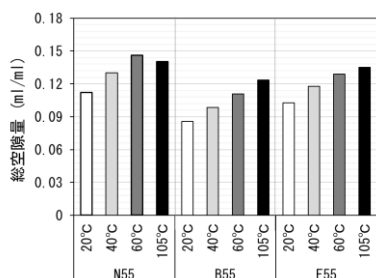


図-3 総空隙量

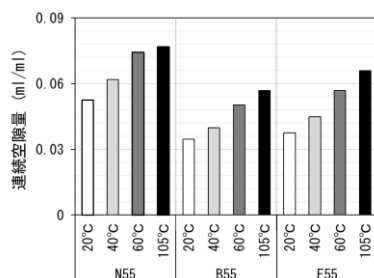


図-4 連続空隙量

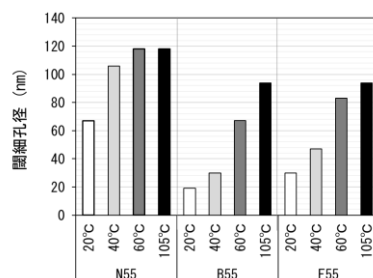


図-5 間細孔径

た結果から総空隙量 (ml/ml), 連続空隙量 (ml/ml) 及び間細孔径 (nm) を導出し, 各指標と液状水の浸透深さの関係について検討した。本研究では, 酒井ら⁹⁾が提案しているパーコレーション理論に基づいた手法を採用し, セメントペースト体積の16%相当の水銀が圧入された時点の空隙径を間細孔径と定義した。

(3) 液状水浸せき試験

図-1 に液状水浸せき試験の試験風景及び概略図を示す。コンテナの底面に布を敷き, その上に供試体を配置した。水面の高さはコンテナの底面から20mmとし, 適宜, 水面低下分の水を供給した。浸せき水には, 24時間以上汲み置いた20°Cの上水道水を用いた。浸せき後, 1, 3, 24, 72, 168時間経過時に供試体を回収し, 重量を測定した後, 速やかにアムスラー万能試験機を用いて供試体を割裂した。液状水浸透深さの測定方法は, JSCE-G 582-2018 に準拠し, 現像剤(水漏れ検査剤)を割裂面に噴霧して発色している部分の先端を金属製直尺を用いて測定した。浸透深さは測定箇所3点の平均値とした。現像剤噴霧後の割裂面の発色状況の一例を図-2 に示す。液状水が浸透した箇所は, 濃い桃色に発色する。

3. 実験結果

3.1 空隙構造分析

乾燥後の表層10mmの総空隙量, 連続空隙量及び間細孔径を図-3 から図-5 に示す。各図中20°Cに着目すると, 各指標いずれもB55, F55, N55の順に空隙が緻密であることを示しており, 混和材を用いたことで空隙構造が緻密化していることが分かる。乾燥後もその傾向を維

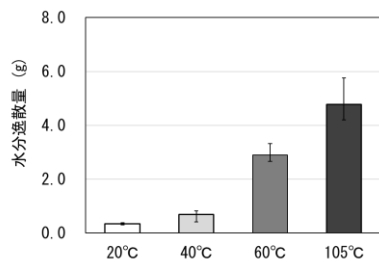
持しているが, 乾燥温度の上昇に伴い, 総空隙量や連続空隙量は増加し, 間細孔径も大幅に粗大化していることを確認できる。本結果から, 乾燥が空隙構造に与える影響が極めて大きいことが分かるが, これは乾燥による水和物の化学的変化⁹⁾や空隙自体の物理的な構造変化¹⁰⁾に起因していると推察される。

3.2 重量変化

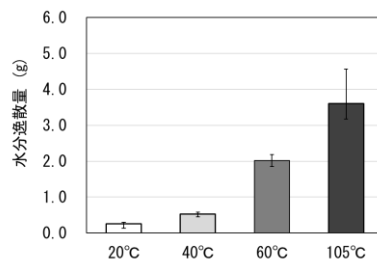
乾燥による水分逸散量の平均値を図-6 に示す。図中の水分逸散量は, それぞれ供試体11本もしくは12本の平均値を示している。結果を見ると, いずれのシリーズにおいても, 乾燥温度が高いほど水分の逸散量が増加する傾向にあることが分かる。次に, 浸せき時間の平方根と吸水量の関係を図-7 に示す。全体の傾向として乾燥温度が高いほど吸水量は増加した。ただし, N55に関しては105°Cよりも60°Cの方が吸水しているが, 本現象の原因は不明である。時間の経過とともに吸水速度は低下しているものの, 全シリーズ168時間経過時も吸水は継続していた。

3.3 液状水浸せき試験

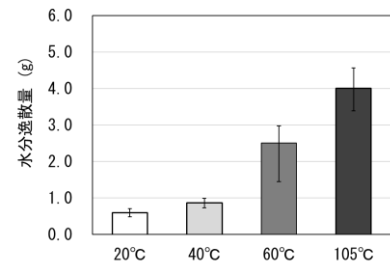
液状水浸せき試験の結果を図-8 に示す。全シリーズ乾燥温度が高いほど液状水がより深くまで浸透していることを確認できる。N55では, 乾燥温度60°Cの供試体が最も深くまで浸透しているが, これは前節で示した吸水量の結果と整合している。実際に, 図-9 に示すように, 吸水量と浸透深さの関係はよく対応していることが分かる。B55, F55では, 液状水の浸透が抑制されていることが分かる。これは空隙構造が緻密であることが要因の一つとして考えられる。ただし, 乾燥温度20°C及び40°C



(a) N55

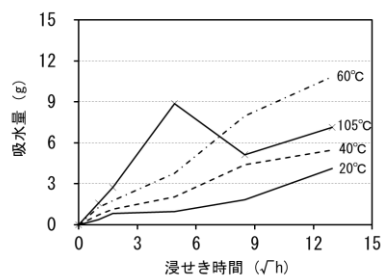


(b) B55

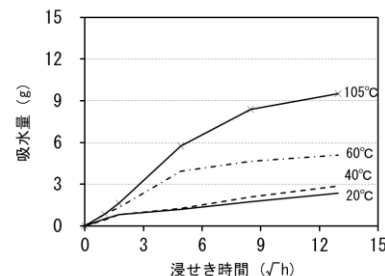


(c) F55

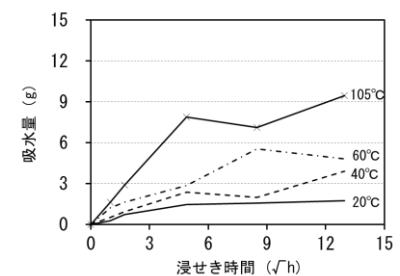
図-6 乾燥による水分逸散量



(a) N55

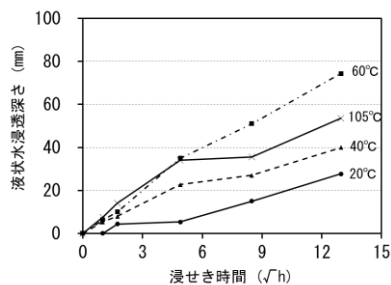


(b) B55

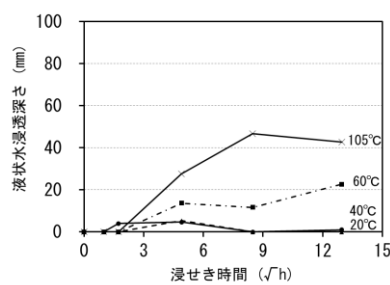


(c) F55

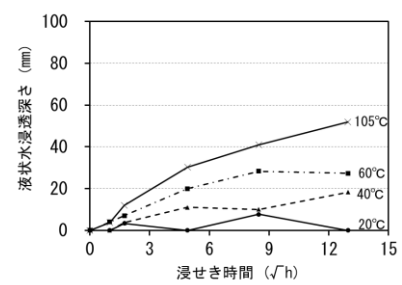
図-7 吸水量の経時変化 (√t)



(a) N55



(b) B55



(c) F55

図-8 液状水浸透深さの経時変化 (√t)

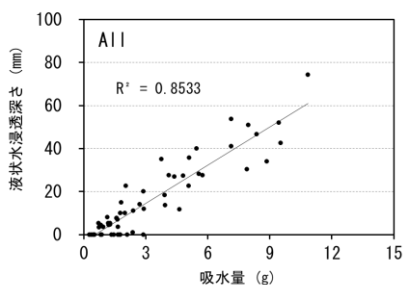
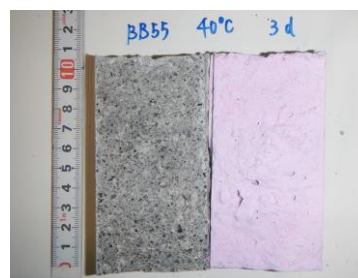
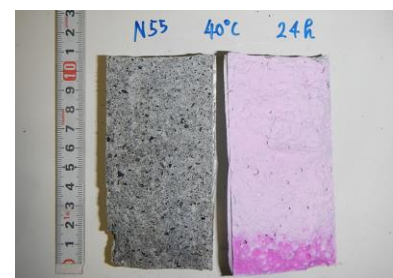


図-9 吸水量と浸透深さの関係



(a) 浸透が確認されなかった供試体



(b) 浸透が確認された供試体

図-10 浸せき後の供試体割裂面の比較 (同等の吸水量)

においては、吸水量が増加しているにもかかわらず液状水の浸透を現像剤及び目視で確認できない供試体が複数存在した。図-10に浸透が確認できなかった供試体の割裂面と浸透を確認できなかった供試体と概ね同等の吸

水量で浸透を確認できた供試体の割裂面を示す。本現象は、主に混和材を用いた硬化体で確認された。このため、本研究で用いた現像剤と混和材を用いた硬化体の相性がよくなかったか、もしくは同等の吸水量であっても、混

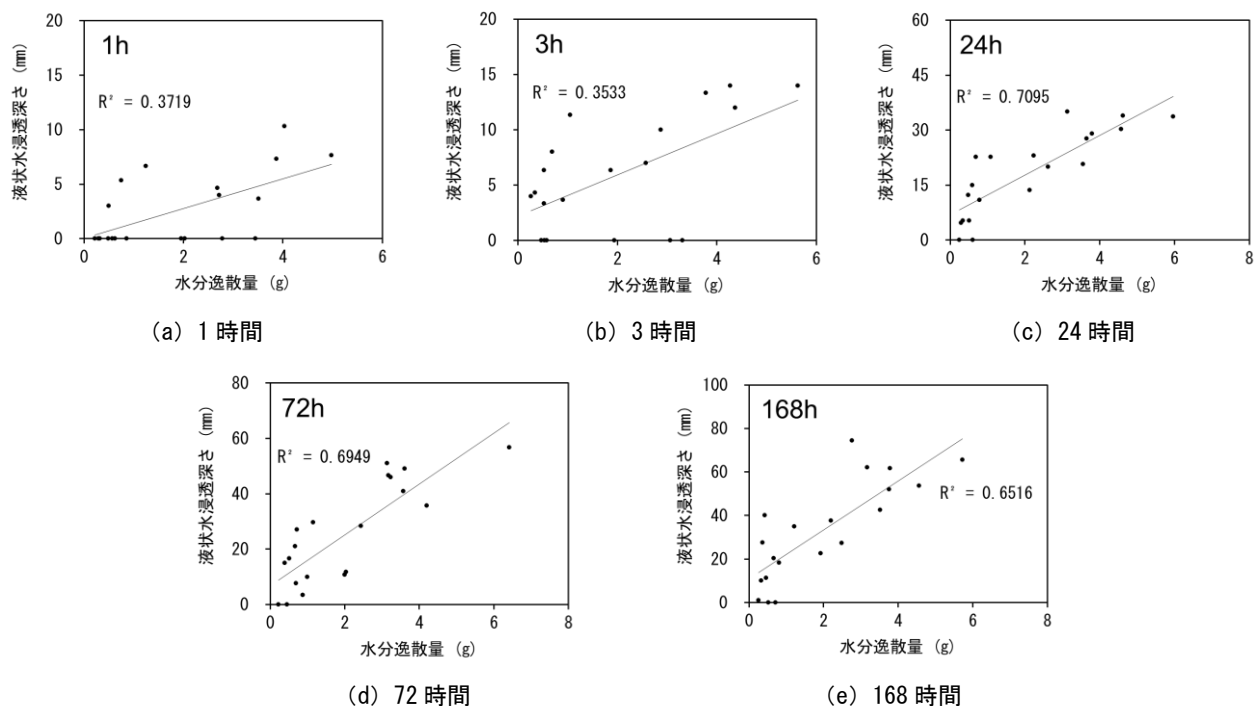


図-11 水分逸散量と液状水浸透深さの関係

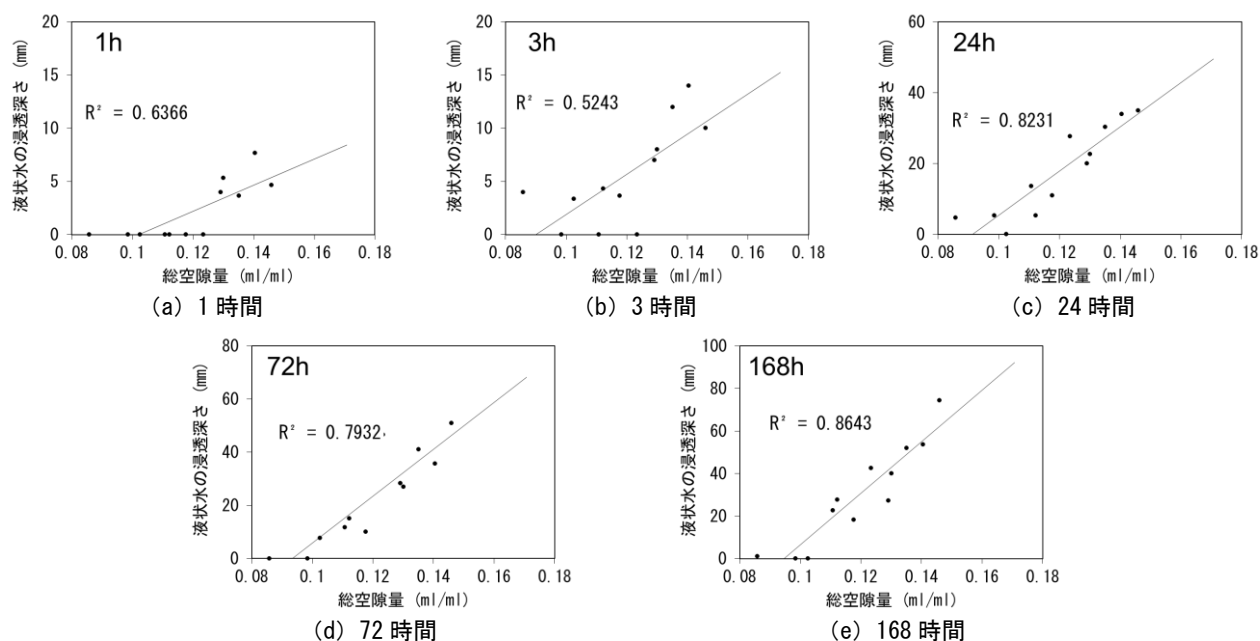


図-12 総空隙量と液状水浸透深さの関係

和材を用いた硬化体特有の空隙構造に起因して現像剤が反応できない空隙に優先的に液状水が浸透したために呈色しなかった可能性が考えられる。混和材を用いた場合にも精度よく液状水の浸透深さを評価するためには、今後本現象の理解が必要不可欠であると考えられる。

4. 乾燥による水分逸散と液状水浸透性状の関係

本章では、乾燥による水分の逸散が液状水の浸透性状に及ぼす影響について考察する。図-11 に水分の逸散量

と液状水の浸透深さの関係を浸せき時間ごとに整理した結果を示す。図中の近似直線の決定係数に着目すると、浸せき後1時間で $R^2=0.3719$, 3時間で $R^2=0.3533$ であり、浸せき初期は極めて低い値を示していることが分かる。浸せき24時間以降にやや増加する傾向にあるが、最大でも24時間経過時の $R^2=0.7095$ であり、水分逸散量と液状水の浸透深さに良好な対応は見られなかった。したがって、乾燥に伴う液状水浸透性状の変化は水分逸散以外に直接的な影響要因が存在すると推察される。

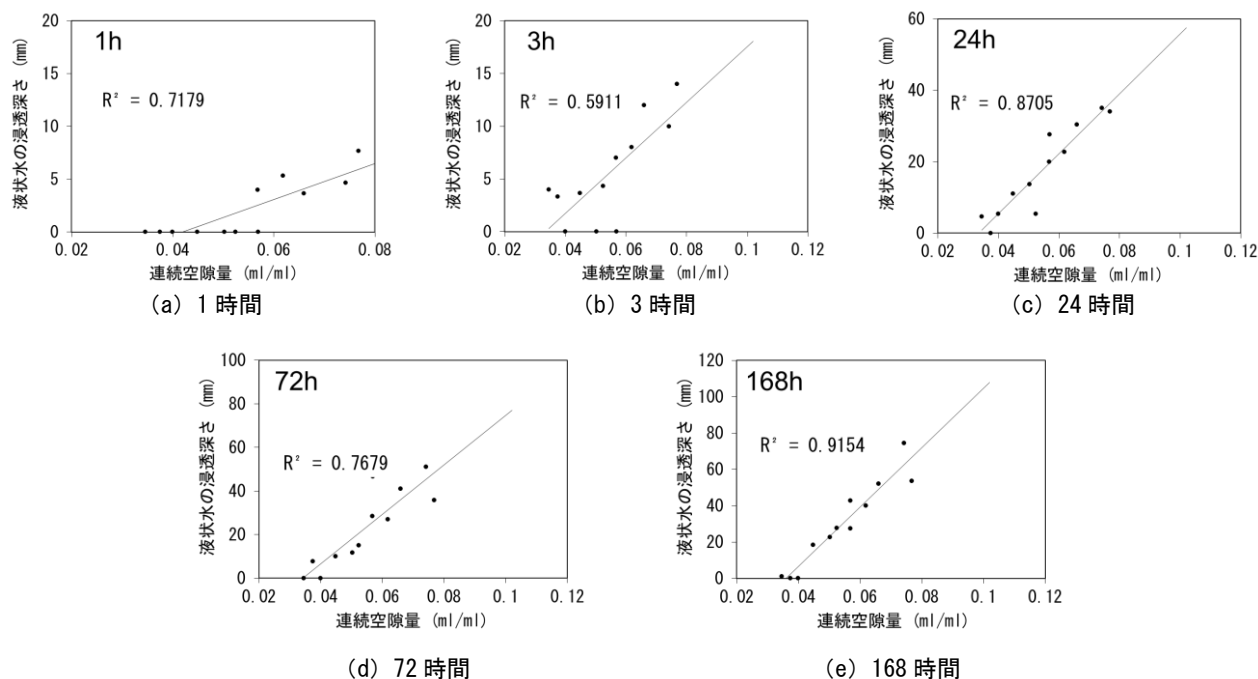


図-13 連続空隙量と液状水浸透深さの関係

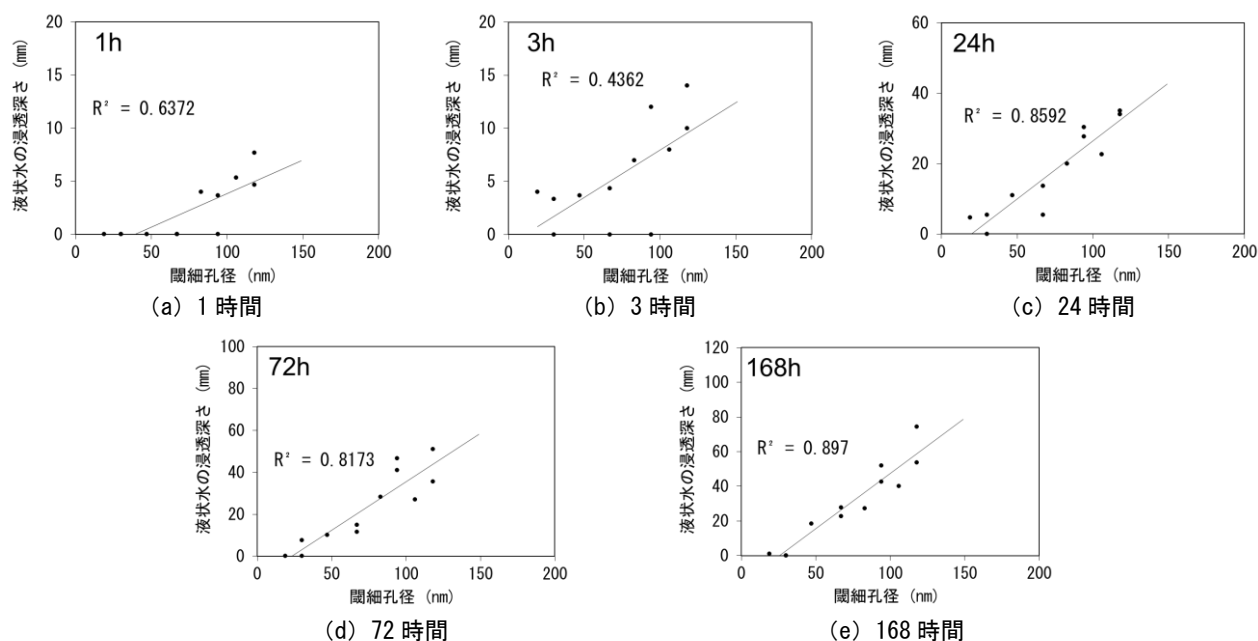


図-14 間細孔径と液状水浸透深さの関係

5. 乾燥による空隙構造の変化と液状水浸透性状の関係

本章では、空隙構造の指標として、総空隙量、連続空隙量及び間細孔径に着目し、乾燥による空隙構造の変化が液状水の浸透性状に及ぼす影響について考察する。

5.1 総空隙量

総空隙量と液状水の浸透深さの関係を浸せき時間ごとに整理した結果を図-12 に示す。図中の分布を見ると、全ての時間で右肩上がりの傾向を確認できる。浸せき初期の決定係数は、水分逸散量と同様に低いものの、浸せき 24 時間以降に決定係数が大幅に高くなり、168 時間経

過時には $R^2=0.8643$ となった。したがって、乾燥による液状水の浸透性状の変化は総空隙量の増加の影響を受けていると推察される。これは、液状水の浸透可能領域が増えたことに起因すると考えられる。

5.2 連続空隙量

連続空隙量と液状水の浸透深さの関係を浸せき時間ごとに整理した結果を図-13 に示す。図中の決定係数に着目すると、水分逸散量や総空隙量と比べて、より良好な対応関係を確認できる。特に 24 時間以降はよく対応しており、24 時間で $R^2=0.8705$ 、168 時間で $R^2=0.9154$ となっ

た。総空隙量は、連続空隙量とインクボトル空隙¹⁾量の総和であるが、液状水等の物質が実際に移動する場となるのは連続空隙である。このため連続空隙量は、総空隙量と比べて、より直接的に液状水の浸透に関する指標であるため、総空隙量以上に良好な対応が見られたのではないかと考えられる。

以上より、乾燥による液状水の浸透性状の変化は連続空隙量の変化の影響を強く受けていることが示唆された。このため、液状水の浸透抵抗性は乾燥による連続空隙量の増加により低下すると考えられる。

5.1 閾細孔径

閾細孔径と液状水の浸透深さの関係を浸せき時間ごとに整理した結果を図-14に示す。図を見ると、空隙量および連続空隙量と同様に、浸せき後24時間以降の決定係数が高いことが分かる。最大値は168時間の $R^2=0.897$ となっており、閾細孔径と液状水の浸透深さには明確な対応関係が見られる。閾細孔径は、連続した空隙の中で物質が通らざるを得ない最小の空隙径であり、各種物質移動と高い相関があることが知られている²⁾。

以上より、液状水の浸透性状は閾細孔径の影響を強く受けていることが示唆された。

6. まとめ

本研究では、乾燥による水分の逸散や空隙構造の変化がセメント硬化体への液状水浸透性状に及ぼす影響について検討するため、複数の配合で作製したモルタル供試体に対して異なる温度条件で乾燥を与え、空隙構造分析、重量変化測定及び液状水浸せき試験を行った。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 乾燥温度の上昇に伴い、水分逸散量、総空隙量及び連続空隙量は増加し、閾細孔径も粗大化した。液状水の浸透深さも同様の傾向を示しており、乾燥により液状水の浸透に対する抵抗性が低下することを確認した。
- (2) 本研究では、現像剤（水漏れ検査剤）を用いて液状水の浸透深さを測定したが、混和材を用いたシリーズにおいて、吸水量は増加しているものの、主に混和材を用いたシリーズにおいて、液状水の浸透を確認できない供試体が複数見受けられた。より正確に液状水の浸透深さを測定するためには、今後本現象の理解が必要であると考えられる。
- (3) 乾燥による液状水浸透性状の変化と水分逸散量の間には明確な対応関係は見られなかった。一方で、総空隙量、連続空隙量及び閾細孔径との関係は良好であったことから、乾燥による液状水浸透性状の変化は空隙構造の変化に強く依存していることが示

唆された。ただし、105℃のような高温で乾燥した場合、骨材界面等におけるクラックなど、微細な損傷の影響についても今後検討する必要がある。

謝辞

本研究は、公益財団法人鴻池奨学財団の研究助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 松田芳範：コンクリートの耐久性を定める「水」の制御 ①コンクリート構造物の劣化・損傷に及ぼす水の影響について、コンクリート工学, Vol.51, No.10, pp.814-818, 2013.10
- 2) (社)土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2018.3
- 3) 鈴木浩明, 玉井謙, 上田洋：コンクリート表層における水分浸透深さの時間依存性及び水セメント比と養生の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.751-756, 2013.7
- 4) 国重典宏, 田村隆弘, 二宮純, 森岡弘道：山口県における「コンクリートひび割れ制御システム」について, コンクリート工学, Vol.49, No.5, pp.91-95, 2011.5
- 5) 細田暁：復興道路での品質確保と人材育成, コンクリート工学, Vol.53, No.1, pp.66-70, 2015.1
- 6) 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 濱幸雄：乾燥および乾湿繰り返しによる硬化セメントペーストの微細構造変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.993-998, 2007.7
- 7) 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦：乾燥によるコンクリート組織の不均質化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.711-716, 2002.6
- 8) 酒井雄也, 中村兆治, 岸利治：閾細孔径と透気・透水および気体の透過挙動との対応に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.67, pp.464-471, 2014.2
- 9) 黒澤利仁, 湊大輔, 服部廉太, 名和豊春：C-S-Hの構造変化に及ぼす外的要因の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.65, No.1, pp.146-152, 2011
- 10) 影山雄哉, 鎌田知久, 岸利治：乾湿繰り返し作用が養生の異なるセメント硬化体に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.657-662, 2018.7
- 11) 岸利治, 吉田亮：硬化セメントペーストが内包する複数のインクボトル幾何構造に関する研究, 生産研究, Vol.60, No.5, pp.512-515, 2008