

論文 モルタルの乾燥程度および空隙構造が液状水浸透特性に与える影響

金氏 裕也*1・黒田 保*2・吉野 公*3・後藤 智和*4

要旨: モルタルの乾燥程度および空隙構造が、モルタル中の液状水浸透特性に与える影響を液状水浸漬試験により検討した。モルタルの乾燥程度は「絶乾状態」と絶乾状態と飽和状態の割合が約 1:1 である「半乾燥状態」と設定した。また、モルタルの浸透面から約 100 mm までの範囲を水セメント比 0.65、浸透面から約 100 mm 以深を水セメント比 0.45 として空隙構造の差を与えた。液状水浸漬試験の結果、半乾燥状態のモルタルは絶乾状態のモルタルと比較して液状水が浸透しにくいことを確認した。また、空隙構造が粗から密に変化するモルタルの場合、粗な空隙中の液状水の浸透が抑制されることを確認した。

キーワード: 液状水浸透, 飽和度, 乾燥程度, 空隙構造

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化要因の一つである中性化による鋼材腐食の照査では、従来から中性化残りによる鋼材腐食の照査が行われている。コンクリート中に二酸化炭素等が侵入することによりコンクリートが中性化し、コンクリート中の鋼材が腐食しやすい状態となるが、近年、鋼材が腐食するためには鋼材への水分の供給が必要であることが報告されている¹⁾。したがって、現在の中性化による鋼材腐食の照査では、従来の中性化残りによる鋼材腐食の照査に加えて、雨水等が供給されることにより生じるコンクリート中の液状水の浸透の影響も考慮されている²⁾。液状水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査で用いられる液状水の浸透予測には、毛細管中の液状水の浸透を表現するために一般的に用いられている Washburn 式が準用されている。ここで、Washburn 式に用いられるコンクリート中の水分浸透速度を表す係数（以下、水分浸透速度係数）は、コンクリートの水分浸漬試験を用いた「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験法（JSCE-G 582-2018）」によって求めることができる。水分浸漬試験では、温度 20 ± 2 °C かつ相対湿度 $60 \pm 5\%$ の環境で 91 日間乾燥させたコンクリートの円柱供試体を使用し、コンクリートを液状水に浸漬後、液状水の浸透状況をコンクリート割裂面の液状水の浸透に伴う変色により判断する。しかし、浸漬試験開始前からコンクリートの微細空隙中に液状水が存在する場合、浸透した液状水のみを変色により確認することは困難であると考えられる。また、水分浸漬試験では、乾湿繰返し作用による影響は考慮していないため、実環境下で乾湿繰返し作用を受けるコンクリート中の液状水の浸透に対応しているか不明であることが問題点として挙げられる。

また、コンクリート構造物の表層における物質移動抵抗性、強度特性に関する性状等（以下、表層品質）は、構造物の耐久性に大きな影響を与える。土木学会の「構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会」は、「表層」をコンクリート構造物の中で、環境条件や養生等の影響を受けて性能が変化する可能性がある領域と定義し、構造物の劣化予測を行う上で、表層品質を考慮する必要があることを指摘している³⁾。また、同委員会は、表層のコンクリートの物質移動抵抗性が特に構造物の耐久性に影響を与えることを指摘している。中性化や塩害等による鋼材腐食は液状水が関与するため、コンクリート構造物の表層における液状水の浸透挙動を把握することは重要である。コンクリート構造物の表層は、乾燥の影響や施工不良等によりコンクリート中の空隙構造は粗な状態になると考えられる。一方、コンクリート内部は、乾燥等の外的要因により空隙構造が粗な状態になることは少ないと考えられる。また、コンクリート中の内在水により水和反応が生じるため、コンクリート内部の空隙構造はコンクリート構造物の表層と比較して密な状態であると考えられる。したがって、コンクリート構造物の表層と内部ではコンクリート中の空隙構造に差があると考えられる。コンクリート構造物の表層における液状水の浸透挙動を把握するためには、コンクリート中の空隙構造の差による液状水の浸透特性を明確にする必要がある。

本稿では、モルタルの乾燥程度（以下、乾燥度）および空隙構造の差が、モルタル中の液状水浸透特性に与える影響を液状水浸漬試験により検討した。本検討における乾燥度は、「絶乾状態」に加え、乾燥状態と飽和状態の割合が約 1:1 である「半乾燥状態」と設定した。また、水セメント比を変化させることにより、空隙構造が粗か

*1 鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

*3 鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 工博 (正会員)

*4 鳥取大学大学院 持続性社会創生科学研究科工学専攻

ら密に変化するモルタルを再現し、空隙構造の差による液状水の浸透特性を把握する。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体として用いるモルタルの配合は、水セメント比がモルタル中の液状水の浸透に及ぼす影響を確認するために表-1 に示すものとした。配合のケースは普通ポルトランドセメントを使用して、水セメント比を 0.45, 0.65 とした。また、モルタルの配合は、空気量 $4.5 \pm 1.5 \%$ 、スランプ $8.0 \pm 1.5 \text{ cm}$ の条件を満足するコンクリートの配合をモルタルに換算した値を設定した。ここで、水の密度は 1.00 g/cm^3 、セメント（普通ポルトランドセメント）の密度は 3.16 g/cm^3 、細骨材の表乾密度は 2.66 g/cm^3 、粗骨材の表乾密度は 2.76 g/cm^3 である。化学混和剤は、AE 減水剤（リグニンスルホン酸系 AE 減水剤）、AE 剤（アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤）を使用した。また、モルタル形状は $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ とし、打設後の型枠養生を 1 日、脱型後は 27 日間の水中養生を実施した。さらに、水中養生終了後に、モルタルを $105 \text{ }^\circ\text{C}$ の乾燥炉で前日との質量差が 0.1% 以内になるまで乾燥した。乾燥後、モルタルが気中の水分を吸水しないように防水性被覆材（エポキシ系樹脂）によりモルタル側面を被覆した。また、ブリーディングの影響による浸透面の粗雑化を生じさせないために、打設底面を浸透面とし、剥離剤の影響を除去するために浸透面を研磨した。

モルタルの水セメント比の差による液状水の浸透挙動の変化を確認するため、水セメント比を 0.45, 0.65 とした。沼尾ら⁴⁾はモルタルの細孔径分布の測定から、水セメント比が大きい程、平均細孔径と全細孔体積が増大することを確認している。したがって、水セメント比が小さい程、モルタル中の空隙構造が緻密となるため、空隙

中の液状水の浸透が抑制されると考えられる。

モルタル中の内在水が液状水の浸透に及ぼす影響を確認するため、液状水浸漬試験開始直前のモルタルの初期の乾燥状態は「絶乾状態」、「半乾燥状態」の 2 ケースとした。ここで、「絶乾状態」は被覆前のモルタルを $105 \text{ }^\circ\text{C}$ の乾燥炉で乾燥して前日との質量差が 0.1% 以内となった状態と定義し、図-1 (a) に示すようにモルタル中の連続空隙が液状水の浸透経路となる状態を考えている。モルタル中の内在水が液状水の浸透に及ぼす影響を確認することを目的としているため、モルタル中の液状水の浸透速度が最大となるモルタルの乾燥度の条件を採用する必要があり、乾燥度に関してより安全側の評価基準となる絶乾状態を採用した。また、「半乾燥状態」は図-1 (b) に示すように浸透面から約 100 mm 以深のモルタル中の空隙を液状水で満たした状態と定義する。モルタルの空隙中を液状水が浸透するためには、空隙中に内在する気体を排出する必要があると考えられる。また、液状水の吸水試験により、半乾燥状態のモルタルの浸透面から約 100 mm 以深の部分を完全に液状水で満たすことは困難であると考えられるため、図-2 に示すように液状水が内在する空隙（不連続空隙）と気体が内在する空隙（連続空隙）が存在すると考えられる。モルタルの空隙中に液状水が内在する場合、液状水の浸透に伴い排出される気体は連続空隙中を移動すると考えられるため、不連続空隙部が多くなると気体の排出が制限され、それに伴い液状水の浸透が抑制されると考えられる。そこで、半乾燥状態のモルタルの液状水浸漬試験により、空隙中に液状水が存在することに起因する気体の排出機能の低下がモルタル中の液状水の浸透挙動に与える影響を把握する。半乾燥状態は、まず飽和状態のモルタルの質量と絶乾状態のモルタルの質量の差分である水分量を測定し、水分量が半分となるために必要な吸水期間を設定した。次に

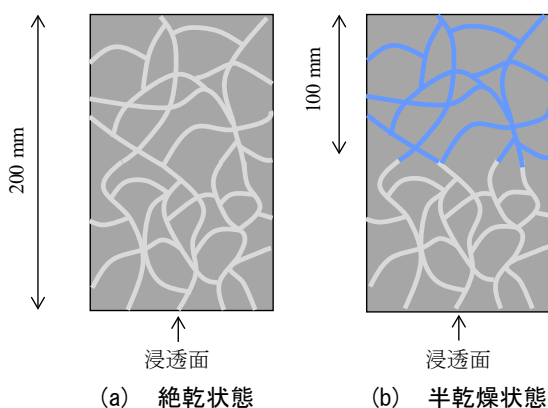


図-1 モルタルの乾燥度

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)		
		W	C	S
45	7.4 ± 1.5	271	602	1236
65	7.3 ± 1.5	268	412	1408

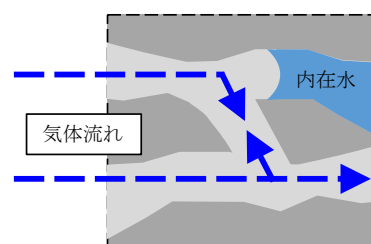


図-2 気体の排出機能の低下（内在水の影響）

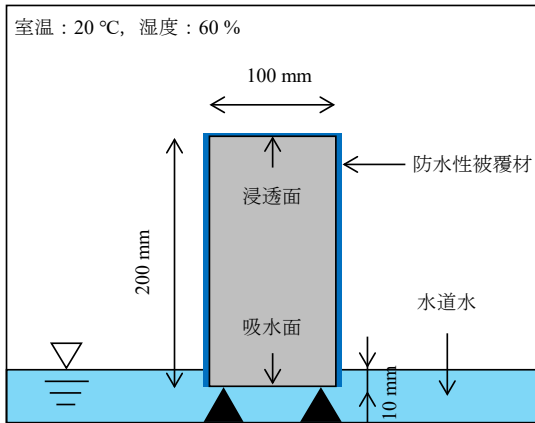


図-3 液状水吸水試験概要

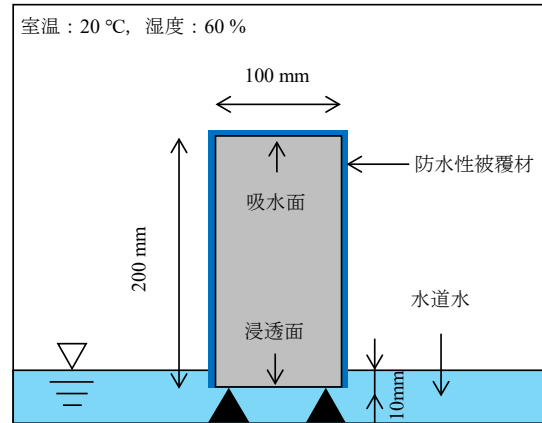


図-6 液状水浸漬試験概要

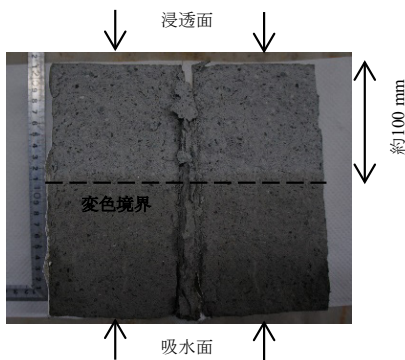


図-4 半乾燥状態のモルタルの
割裂断面

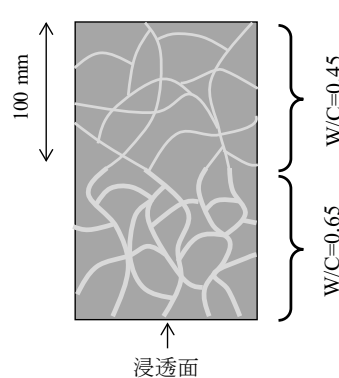


図-5 モルタルの空隙構造

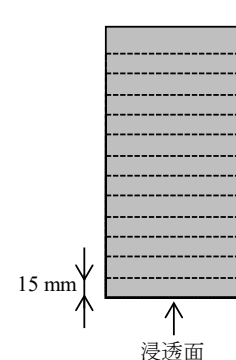


図-7 モルタルの切断位置

設定した吸水期間、図-3 に示すようにモルタルの浸透面と反対となる面（以下、吸水面）から吸水させ、吸水後のモルタルの乾燥状態を「半乾燥状態」と定義する。図-4 に吸水期間を3日と設定した場合のモルタルの割裂断面を示しており、液状水の浸透フロント位置を示す変色境界が浸透面から約100 mm（モルタル長さ200 mm）の位置にあり、割裂断面からモルタル中の水分量がほぼ半分であることを確認した。

モルタル中の空隙構造の差が液状水の浸透に及ぼす影響を確認するため、図-5 に示すようにモルタルの配合を、浸透面から約100 mmまでの範囲を水セメント比0.65、浸透面から約100 mm以深を水セメント比0.45とした。空隙構造を変化させたモルタルは、まず水セメント比0.65のモルタルを打設底面から約100 mmまで打設し、その後、水セメント比0.65のモルタル上に水セメント比0.45のモルタルを打設した。水セメント比が小さい程、モルタル中の空隙構造が緻密、すなわち微細空隙径が小さくなるため、水セメント比0.45のモルタルは水セメント比0.65のモルタルと比較して空隙中の気体の粘性摩擦の影響が大きくなる。したがって、水セメント比0.45のモルタル部で気体の排出速度が低下し、水セメント比0.65のモルタル中の液状水の浸透挙動に影響を与えると考えられる。

2.2 液状水浸漬試験

(1) 試験方法

液状水浸漬試験の概要を図-6 に示す。モルタルが気中の水分を吸水しないように、液状水浸漬試験開始前に各種乾燥状態のモルタルの浸透面以外を被覆した（以下、片面開放）。ここで、片面開放状態のモルタルの液状水浸漬試験の結果は、吸水面も開放した状態（以下、両面開放）のモルタルの液状水浸漬試験の結果と比較して、空隙中の気体の流れが制限され液状水の浸透が阻害されると考えられるが、既往のモルタルの液状水浸漬試験の結果より浸漬期間が7日程度では開放状態の違いによる液状水の浸透に大きな差はないと考えられる。よって、本検討では、液状水浸漬試験に用いるモルタルは片面開放状態とした。液状水には水道水を使用し、液状水浸漬期間は1, 3, 7日とした。モルタルの配合は水セメント比0.65, 0.45とし、初期の乾燥状態は絶乾状態、半乾燥状態とした。また、空隙構造が変化する絶乾状態のモルタルを用いた液状水浸漬試験も行った。

(2) 飽和度の設定

モルタル中の液状水の浸透を確認するために、浸漬試験後のモルタルを図-7 に示すように15 mm厚の試験片に切断し、試験片の質量 m_a [g] を測定する。測定後、試験片を105°Cの乾燥炉で乾燥し、絶乾状態の試験片の質

量 m_d [g]を測定する。さらに、絶乾状態の試験片を吸水させ、飽和状態の試験片の質量 m_s [g]を測定する。各試験片の飽和状態における水分量と浸漬試験後の水分量から飽和度 S_r [%]を次式に従い算出する。

$$S_r = \frac{m_d - m_d}{m_s - m_d} \times 100 \quad (1)$$

また、半乾燥状態のモルタルの初期飽和度に関しても同様に式(1)から飽和度を算出する。絶乾状態の初期飽和度は、液状水への絶乾状態のモルタルの浸漬試験（1日浸漬）により得られた液状水が浸透していない範囲の飽和度を用いた。液状水が浸透していない範囲の飽和度は、モルタル高さ方向に対してほぼ一定であるため、この飽和度を平均し、絶乾状態のモルタル全体の飽和度とした。

3. 試験結果および考察

3.1 モルタルの乾燥程度が浸透特性に与える影響

図-8は絶乾状態の水セメント比 0.45 のモルタルを液状水に1日浸漬した場合の飽和度の分布を示し、測定結果のばらつきを確認するため、同条件で3データを記録した。図-8の縦軸は飽和度 S_r 、横軸はモルタルの任意断面位置であり、0 mm 位置が浸透面を示す。ここで、コンクリートの強度試験の測定値の棄却検定で用いられる Smirnov の方法⁹⁾により、測定結果の棄却検定を行った。測定された浸透高さに対して有意水準を5%として棄却検定を行った結果、Data.2の測定結果を棄却した。Data.2の浸透フロント位置付近（浸透面から約60 mm位置）の飽和度は、Data.1とData.3の飽和度と比較して約20%の差が生じた。浸透フロント位置の飽和度の差が20%以上生じた場合、液状水の浸透挙動に変化が生じたと判断することができると考えられる。本検討では、1つの試験条件に対して1データを測定しているが、測定結果のばらつきを考慮して1つの試験条件に対して3データ以上を測定し、測定結果の棄却検定を行う必要がある。また、飽和度が急激に低下する位置を浸透面からの液状水の浸透高さとし、本検討では飽和度が20%程度以上低下する位置を目安に液状水の浸透高さとした。

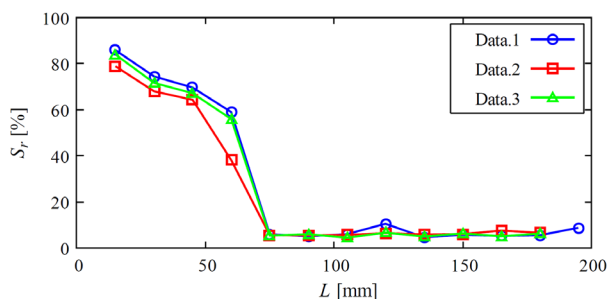


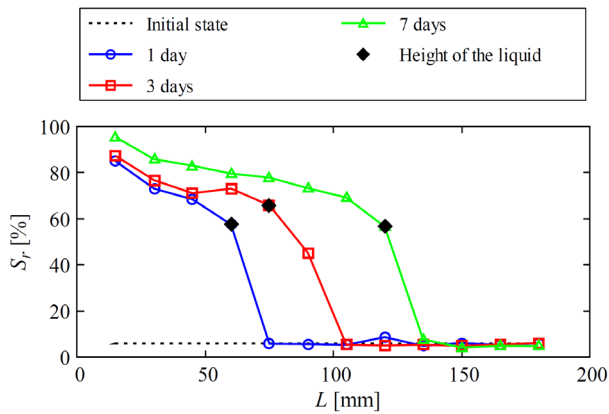
図-8 飽和度の測定結果
(W/C=0.45, 絶乾状態, 1日浸漬)

図-9は絶乾状態のモルタルを用いた場合の液状水浸漬試験から得られた飽和度の分布を示す。図-9より絶乾状態のモルタルを液状水に1日浸漬した場合の液状水の浸透高さは、水セメント比の差に因らず60 mmであり、飽和度分布は概ね等しいことを確認した。これは、浸漬期間が極めて短期間であったため、水セメント比の差による液状水の浸透挙動の差が明確に確認できなかったと考えられる。一方、3日、7日浸漬した場合、水セメント比の差による液状水の浸透高さの差が生じ、各浸漬期間の水セメント比 0.45 のモルタルの液状水の浸透高さは、水セメント比 0.65 のモルタルより小さくなることを確認した。これは、水セメント比が小さい程、モルタル中の空隙構造が緻密、すなわち微細空隙径が小さくなり、空隙中を浸透する液状水に作用する粘性摩擦力が大きくなるためであると考えられる。

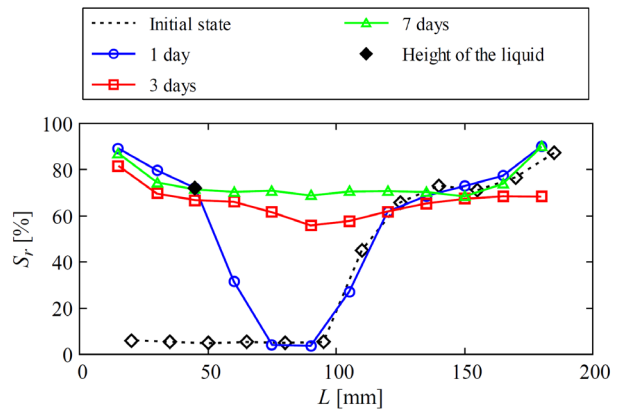
図-10は半乾燥状態のモルタルを用いた場合の液状水浸漬試験から得られた飽和度の分布を示す。図-9と図-10より、モルタルの空隙中の内在水が、モルタル中の液状水の浸透挙動に与える影響を考察する。図-9と図-10より、モルタルを液状水へ1日浸漬した結果、水セメント比の差に因らず絶乾状態では液状水の浸透高さが60 mmである一方、半乾燥状態では45 mmであることを確認した。したがって、水セメント比の差に因らず、半乾燥状態のモルタルは絶乾状態のモルタルと比較して液状水が浸透しにくいことが考えられる。これは、図-2に示すように、モルタルの空隙中に液状水が存在する場合、不連続空隙部が生じることにより気体の排出が制限され、それに伴い液状水の浸透が抑制されたためであると考えられる。また、モルタルを液状水へ3日、7日浸漬した結果より、浸透した液状水と内在水が接触することを確認した。

3.2 モルタルの空隙構造の差が浸透特性に与える影響

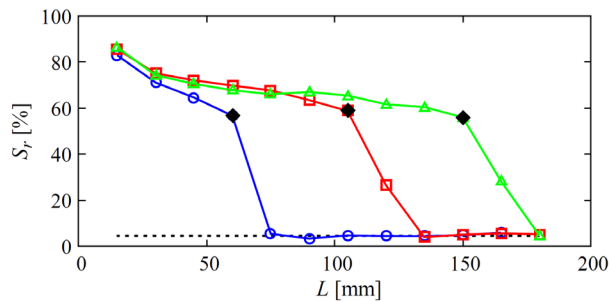
浸透面から約100 mmまでの範囲の水セメント比 0.65 のモルタルに着目し、浸透面から約100 mm以深のモルタルの空隙構造の変化の有無が液状水の浸透挙動に与える影響を考察する。また、モルタルを液状水に7日浸漬させた条件に関しては、水セメント比 0.45 のモルタル部に液状水が浸透しており、空隙構造の差による浸透挙動の変化を測定することができないため考察を省略する。図-9(b)は水セメント比 0.65 のモルタルを用いた場合の試験結果であり、図-11は浸透面から約100 mmまでの範囲を水セメント比 0.65、浸透面から約100 mm以深を水セメント比 0.45としたモルタルを用いた場合の試験結果である。モルタルを液状水に1日浸漬した場合の液状水の浸透高さは、空隙構造の変化に因らず60 mmであり、飽和度分布は概ね等しいことを確認した。一方、モルタル



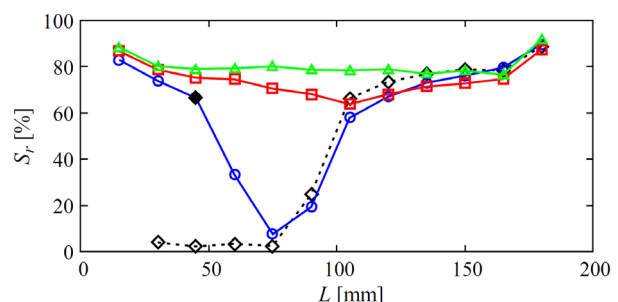
(a) W/C=0.45



(a) W/C=0.45



(b) W/C=0.65



(b) W/C=0.65

図-9 絶乾状態のモルタルの飽和度

図-10 半乾燥状態のモルタルの飽和度

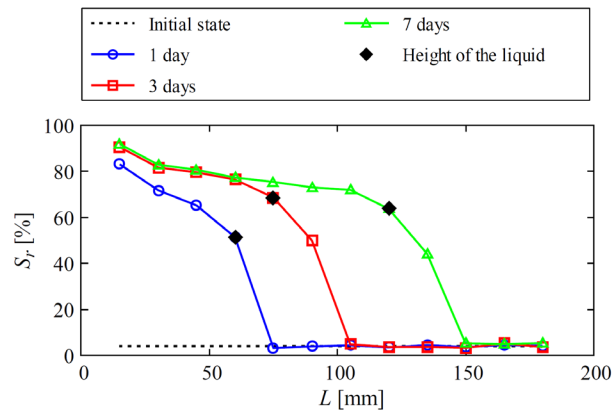


図-11 空隙構造が変化する絶乾状態のモルタルの飽和度

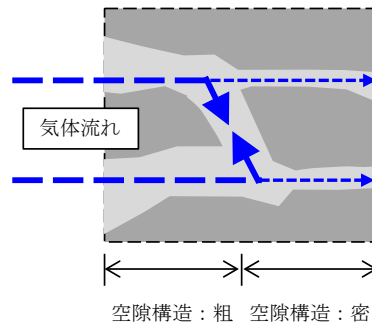


図-12 気体の排出機能の低下（空隙構造の差）

ルを液状水に3日浸漬させた場合の液状水の浸透高さは、空隙構造に差がある場合は75 mmであり、空隙構造に差がない場合は105 mmであるため、モルタルの空隙構造に差が生じる場合では液状水の浸透は抑制されることを確認した。図-12に示すように、モルタルの空隙構造が粗から密、すなわち微細空隙径が大口径から小口径に変化する場合、モルタル中の気体の排出経路が狭くなることにより空隙中の壁面摩擦による気体の粘性摩擦力が大きくなる。気体の粘性摩擦力が大きくなることによって気体の排出速度が低下し、それに伴い液状水の浸透速度が低下したため、モルタルの空隙構造に差が生じる場合

では液状水の浸透は抑制されたと考えられる。

モルタル中の液状水は、浸透面から順次飽和度が100%、すなわち飽和状態になりながら浸透すると想定していたが、図-9～図-11より飽和度は直線勾配を有し低下することを確認した。また、浸透した液状水や内在水が存在する箇所では飽和度が100%とならず、70%程度でほぼ一定となった。ここで、図-13(a)に示すようなモルタル中の微細空隙を考えた場合、液状水は空隙中の壁面との親和性が良いと考えられるため、粗大空隙部では壁面に沿って液状水が移動すると考えられる。さらに図-13(b)に示すように液状水の浸透が進むと、粗大空隙

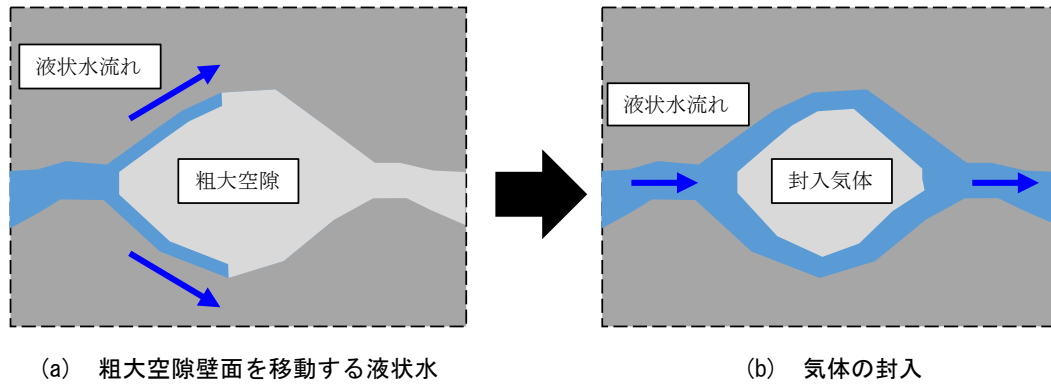


図-13 粗大空隙中の液状水浸透

中に気体が封入されるため、吸水過程において完全に飽和状態に戻らないと考えられる。また、以上の現象は主に毛細管現象により生じるため、対象となる空隙はコンクリートの毛細管空隙である直径 10 nm～5 μm の空隙⁸⁾である。したがって、液状水浸漬試験開始前のモルタルは飽和状態から乾燥により絶乾状態にしているため、液状水浸漬試験開始後および液状水吸水試験開始後のモルタルの飽和度は 100%にならないと考えられる。また、液状水浸漬試験後の飽和度は直線勾配を有し低下しているが、これはモルタルを貫通する空隙以外に不連続空隙が存在することにより気体の排出が制限され、それに伴い液状水の浸透が抑制されたためであると考えられる。

4. まとめ

本稿では、モルタルの乾燥程度および空隙構造が、モルタル中の液状水浸透特性に与える影響を液状水浸漬試験により検討した。以下にまとめを示す。

- (1) 水セメント比の差により液状水の浸透高さが変化することを確認した。これは、水セメント比が小さい程、モルタル中の空隙構造が緻密、すなわち微細空隙径が小さくなり、空隙中を浸透する液状水に作用する粘性摩擦力が大きくなるためであると考えられる。
- (2) 水セメント比の差に因らず、半乾燥状態のモルタルは絶乾状態のモルタルと比較して液状水が浸透しにくいことを確認した。これは、モルタルの空隙中に液状水が存在する場合、不連続空隙部が生じることにより気体の排出が制限され、それに伴い液状水の浸透が抑制されたためであると考えられる。
- (3) モルタルの空隙構造が粗から密に変化する場合、モルタル中の気体の排出経路が狭くなることにより空隙中の壁面摩擦による気体の粘性摩擦力が大きくなる。これにより気体の排出速度が低下し、それ

に伴い液状水の浸透速度が低下したため、液状水の浸透は抑制されたと考えられる。

参考文献

- 1) 古賀一八, 林典男, 平田延明: 高濃度塩化物イオン含有 RC 建築物の含水率および鉄筋腐食調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.783-788, 2008.
- 2) 土木学会 コンクリート委員会ほか: 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 公益社団法人土木学会, pp.148-164, 2017.
- 3) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 80 構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会成果報告書, 公益社団法人土木学会, 2008.
- 4) 沼尾達也, 福沢公夫, Chen, T. Y., 堀辺忍: 硬化モルタルの細孔径分布と水の浸透特性の関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992.
- 5) 小池賢太郎, 山口明伸, 武若耕司: モルタル中の水分移動が塩分浸透に及ぼす影響, コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)成果報告書(その 2)およびシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ No.99 巻, pp. 333-338, 2012.
- 6) 水野俊一: 現場コンクリートの品質を管理するに際しての 2, 3 の問題について, 土木学会論文集, 16 号, pp. 15-22, 1953.
- 7) 河井克之, 軽部大蔵, 芦田渉, 嘉戸善胤: 間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル土木学会論文集, No.666 / III-53, pp. 291-302, 2000.
- 8) Kumar Mehta, P., Paulo J.M. Monteiro; 田澤榮一, 佐伯昇監訳: コンクリート工学 微視構造と材料特性, 技報堂出版, pp. 27-29, 1998.