

論文 セメント硬化体中への液状水浸透に対する抵抗の支配要因に関する検討

鎌田 知久^{*1}・岸 利治^{*2}

要旨：本論文では、コンクリート中への塩化物イオンの浸透が停滞する現象の機構について、特に移流の停滞機構に着目し、液状水の浸透に対する抵抗の支配要因を解明することを目的に検討を実施した。ガラス製マイクロ流路を用いて液状水浸透試験を実施した結果、流路の交差部に気泡や不飽和領域が存在することで浸透が大幅に抑制されることを明らかにした。さらに、溶存空気量を変化させた浸せき水を用いた浸せき試験を実施し、セメント硬化体においても気泡による抑制が作用していることを確認した。以上より、空隙が交差する場所に存在する気泡が液状水の浸透を抑制する支配要因であることが示唆された。

キーワード：移流、液状水浸透、停滞、気泡、不飽和領域

1. はじめに

コンクリート中への塩化物イオンの浸透が停滞する現象が明らかになっている¹⁾。塩化物イオンの浸透現象は、濃度勾配を駆動力とする拡散と毛管張力を駆動力とする移流により生じる。したがって、塩化物イオンの浸透が停滞するには、拡散と移流双方の浸透が停滞する必要がある。停滞機構に関しては、中村ら²⁾により、極微小な空隙では空隙壁面との電氣的相互作用により壁面のゼータ電位が負の値を有する場合に拡散による浸透が停滞する可能性があることが明らかにされている。一方で、移流に関しては、空隙構造が密且つ不飽和湿潤状態にある場合に停滞する可能性があることが確認されているものの、浸透を抑制している支配要因は明らかではない³⁾。

移流による塩分の浸透を考える場合、液状水の浸透挙動が議論の対象となる。岡崎ら⁴⁾が実施した分子動力学シミュレーションにより、極微小空隙においては、空隙壁面との摩擦の影響が支配的になり液状水の浸透が抑制され停止する可能性があることが明らかにされている。この様に極微小な空隙においては、移流による液状水の浸透が停滞する要因は明らかではあるが、空隙壁面との摩擦が支配的になる空隙径は分子のクラスターほどであり極めて小さく、移流の主たる移動経路の空隙径とは大

きくサイズが異なるものと思われる。したがって、移流による浸透をより直接的に抑制する要因が存在することは明白である。

そこで本研究では、比較的大きな空隙内で生じている移流による液状水の浸透が停滞する機構を明らかにするため、マイクロテクノロジーの分野で用いられるガラス製マイクロ流路を用いて移流による浸透を抑制する支配要因の解明を試みる。最終的に、ガラス製の流路で得られた結果がセメント硬化体に対しても適用できるかを検証する。

2. ガラス製マイクロ流路を用いた液状水浸透試験

2.1 ガラス製マイクロ流路の作製

本試験で用いたガラス製マイクロ流路は、図-1 に示す卓上型微細加工機を用いて作製した。マイクロ流路は、76×26×1.3mm の 2 枚のスライドガラスで構成されており、1 枚には深さ 0.5mm、幅 1mm のマイクロ流路が、もう 1 枚には液状水の注水用と排水用の直径 1mm の貫通孔が加工されている。これらを物理的・化学的に洗浄した後、ずれがないように貼り合わせ、645℃で 5 時間焼き上げることで熱融着により接合した。作製例を図-2 に示す。本研究で作製した流路の形状は、コンクリート



図-1 卓上型微細加工機

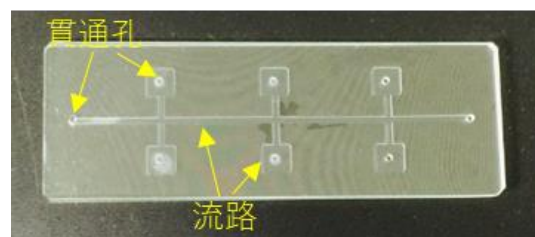


図-2 ガラス製マイクロ流路の作製例

*1 東京大学 生産技術研究所 特任助教 工博 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 教授 工博 (正会員)

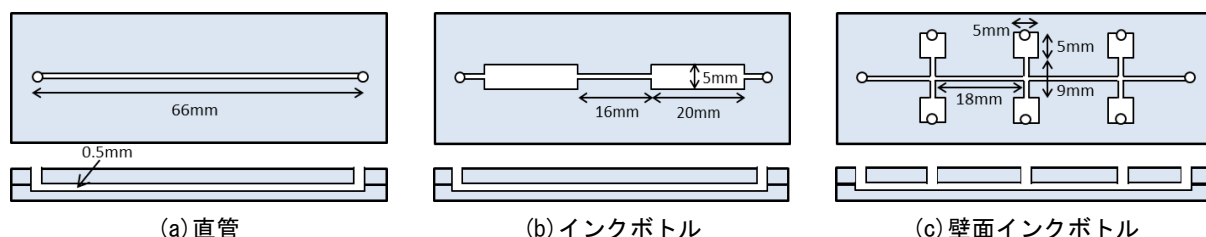


図-3 マイクロ流路のデザイン

の種々の空隙に対応させるため、図-3 に示すように直管のみの流路、主経路にインクボトルを有する流路、そして、壁面にインクボトルを有する流路の計3種類に設定した。

2.2 試験方法

試験の概略図を図-4 に示す。本試験では、流路の形状や流路内の湿潤条件が液状水の浸透に与える影響を確認する。流路内の初期の湿潤条件は、予め試験前に任意の位置に液状水を配置することで設定した。外部から供給する液状水は、初期条件として流路内に存在する液状水と区別するために、食用色粉(青色)を混合させた着色液状水(以降、着色水)を用いた。なお、食用色粉を用いても液状水の浸透挙動に変化がないことを予備試験において確認している。注水孔の周りに義歯安定剤を用いて着色水を溜めておくための堰を作製した。マイクロピペットを用いて作製した堰内に着色水を注水し、着色水注水後の浸透挙動を観察することで、流路の形状や流路内の湿潤条件が液状水の浸透挙動に与える影響を確認した。なお、壁面インクボトルを有する流路では、インクボトル部の貫通孔をセロハンテープで塞いでから着色水を注入した。

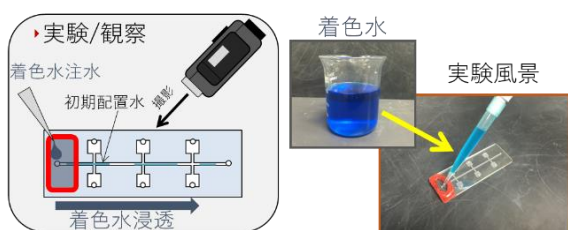


図-4 液状水浸透試験概略図

2.3 試験結果/考察

(1) 流路形状が液状水浸透挙動に与える影響(条件1)

流路の形状が液状水の浸透挙動に与える影響を確認するため、流路内に液状水を配置せず、乾燥状態において液状水の浸透試験を実施した。図-5, 6, 7 は試験前の流路内の湿潤条件と試験終了後の流路内の様子を示している。実験結果を見ると、流路の形状に依らず浸透液である着色液状水が流路の最深部まで到達していることが分かる。また、浸透は瞬時に完了しており、浸透を抑制する影響因子の存在は確認されなかった。壁面インクボトルを有する流路(図-7)では、インクボトル内への浸透は認められず、ボトル内部の空気圧と毛管張力が釣り合い、ボトル内への浸透が抑制されている様に見受けられる。よって、コンクリート空隙内においても、液状水が行き止まりとなる空隙、すなわちデッドエンド空隙に到達した場合には、浸透圧と内部の空気圧が釣り合い、浸透が大幅に抑制されるものと思われる。

以上のように、流路内が乾燥状態にある場合、流路の形状に依らず毛管張力により液状水が急激に浸透することを確認した。これは、コンクリート空隙内が絶乾に近い状態にある際の液状水の浸透挙動と同様の状態を捉えているものと考えられ、著者らが実験的に確認した塩分浸透挙動⁹⁾とよく整合する結果である。

(2) 流路内に存在する液状水が液状水浸透挙動に与える影響(条件2)

流路内に存在する液状水が、液状水浸透挙動に与える影響について検討した結果を図-8 から図-11 に示す。本シリーズでは、流路内の任意の箇所不連続に存在する様に液状水を配置した。液状水の初期位置は図中に模式図として記している。実験結果を見ると、すべての流

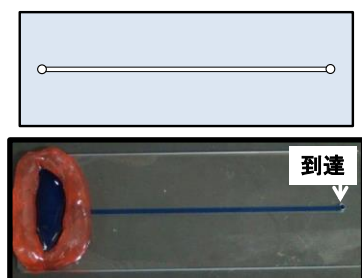


図-5 直管(条件1)

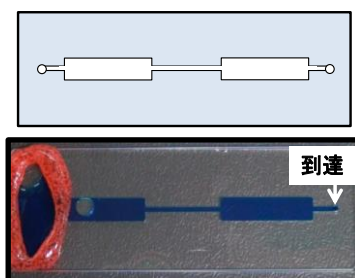


図-6 インクボトル(条件1)

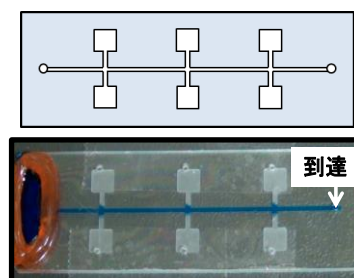


図-7 壁面インクボトル(条件1)

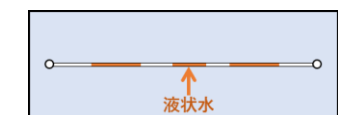


図-8 直管(条件2)

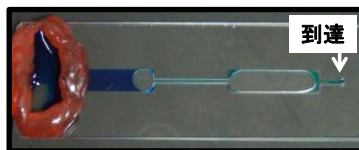
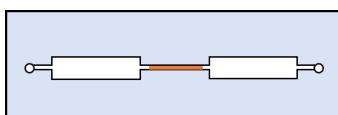


図-9 インクボトル(条件2)

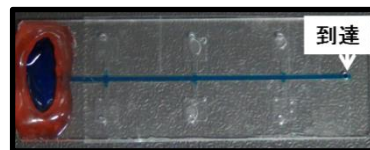
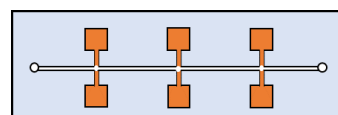


図-10 壁面インクボトル(条件2)

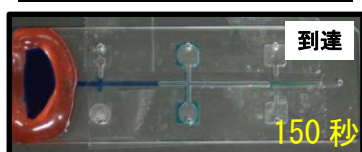
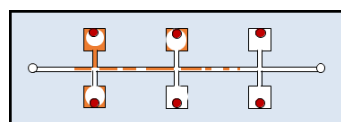


図-11 壁面インクボトル(条件2：無作為配置)

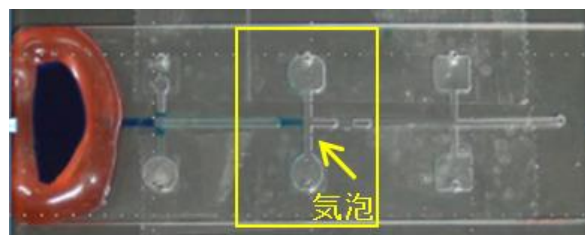


図-12 試験中の流路内の様子

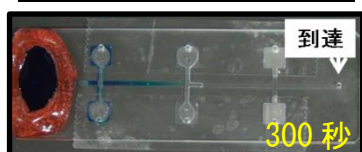
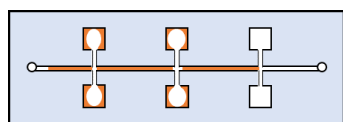


図-13 壁面インクボトル
(条件3：壁面インクボトル内に気泡)

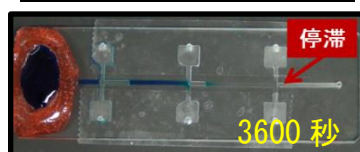
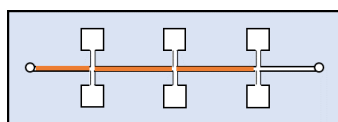


図-14 壁面インクボトル
(条件3：壁面インクボトル内が不飽和)

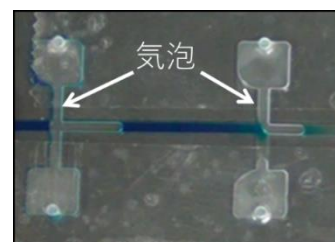


図-15 試験終了後の流路内

路において着色液状水が最深部まで到達した。特に図-8から図-10の条件では、着色水の浸透が瞬時に完了しており、液状水が流路内に存在しても浸透が抑制される様な現象は見受けられなかった。一方で、これまでの条件では、浸透が瞬時に最深部まで到達してきたいのに対して、図-11に示した壁面インクボトルを有する流路では、初期条件として液状水を無作為に配置した結果、浸透に要する時間が増加し、僅かではあるが浸透が抑制されていることを確認した。図-12に示した試験中の流路内の状態に着目すると、図中黄枠内に示した様に、液状水が浸透する過程で主経路とインクボトルの交差部に気泡が存在していることを確認でき、一時的に、この部分の気泡が浸透を抑えている様子を観察することができた。したがって、コンクリート空隙内においても、液状水は不連続に存在していると想定されるため、上記の様な気泡による抑制現象が生じている可能性は高いのではないかと考える。

(3) 流路内に存在する気泡や不飽和領域が液状水浸透挙動に与える影響(条件3)

ここまでの検討結果を踏まえて、流路内に存在する気泡が、液状水浸透挙動に与える影響について検討した。試験の条件と結果を図-13、14に示す。図-13の条件では、壁面インクボトル内に気泡が存在するように、図-14の条件では壁面インクボトル内が不飽和になるように液状水を配置した。実験結果を見ると、これまでの条件とは明らかに異なる液状水浸透挙動を示しており、浸透に要する時間が大幅に増加した。特に不飽和領域を有する図-14の条件では、先端部が試験開始後から動いておらず、3600秒の試験期間内ではあるが液状水の浸透が停滞している様な挙動が認められた。なお、流路内の液状水が着色しているのは、移流による浸透ではなく拡散により浸透したものである。図-15に示した試験後の流路内に着目すると、主経路と壁面インクボトルの交差部に存在する気泡が液状水の浸透を大幅に抑制していることが分かる。

以上の検討より、流路内、特に主経路との交差部に存在する気泡が液状水浸透挙動に与える影響は極めて大きいものと考えられる。コンクリートの空隙はナノメートル

ルからミリメートルまで存在するが、一般にナノ・マイクロバブル（直径 50 μ m 以下）は、時間の経過に伴い内部圧力が上昇し、数秒から数日で自然に圧壊することが知られている⁹⁾。したがって、本検討で確認された現象がコンクリート内でも安定して生じている場合、50 μ m 以上の空隙に存在する気泡が浸透を抑制している可能性が高いのではないかと考えられる。今後はより小径の流路で同様の試験を試みる予定である。

3. セメント硬化体への液状水浸透に対する気泡の影響

前章では、流路の交差部に気泡が存在することで液状水の浸透が大幅に抑制されることを確認した。しかし、ガラス製の流路で生じている現象が実際のコンクリート中の空隙で起きているかは定かでない。そこで本実験では、コンクリートの空隙内においても、液状水の浸透に対して気泡による抑制機構が働いているかを検証するため、溶存空気量を変化させた浸せき水を用いて塩水浸せき試験を実施した。溶存空気量の低い浸せき水を用いることで、空隙内に存在する気泡が浸せき水に溶解込み、浸潤に対する抑制機構が働かなくなると推察される。そして、本実験でこのような結果を得ることができれば、前章で確認した現象がコンクリートの空隙内においても生じているといえるのではないかと考えた。

3.1 供試体概要

本実験では、表－1 に示す配合で作製した $\phi 50 \times 100$ mm のペースト円柱供試体を用いた。供試体は普通ポルトランドセメント(以降、OPC)を用いた N シリーズと OPC にフライアッシュを 20%内割置換(B 種相当)した FA シリ

表－1 ペースト供試体配合表

供試体名称	W/C (%)	置換率 (%)
N40	40	
N50	50	
N60	60	
FA40	40	20
FA50	50	
FA60	60	

表－2 使用材料物性値

セメント	普通ポルトランドセメント(3. 15g/cm ³)
混和材	フライアッシュ(3400cm ² /g)

表－3 浸せき水作製条件

飽和酸素水	水道水に NaCl を添加した濃度 10%塩水を作製
脱気水	真空ポンプを用いて脱気水を作製し、NaCl を添加して濃度 10%の塩水を作製

ーズを用意した。水セメント比は、40、50、60%の 3 水準に設定した。養生方法は、封緘養生の 1 水準であり 28 日間施した。使用材料の物性値を表－2 に示す。供試体は、養生終了後に水冷式カッターを用いて上下端 10mm を切断した。その後、浸せき面(1 面開放)以外の面をエポキシ樹脂を用いて 3 層コーティングした。

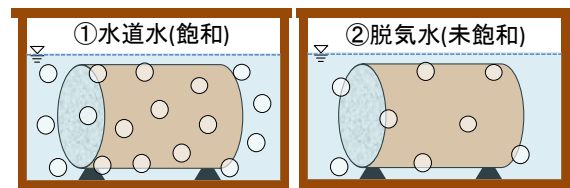
3.2 実験概要

本実験では、図－16 に示すように、異なる溶存空気量に設定した浸せき水に供試体を水平方向に設置し、室内塩水浸せき試験を実施した。浸せき水には、表－3 に示すように 2 水準の濃度 10%塩水を使用した。一つは水道水(飽和状態)、もう一つは真空ポンプ(真空度 6.7 $\times 10^{-2}$ Pa)を用いて 1 時間真空吸引して作製した脱気水(不飽和状態)を使用した。この際、浸せき水の溶存空気量は、図－17 に示すハンディ型ポータブル溶存酸素計(溶存酸素濃度分解能 0.01mg/l)を用いて、溶存酸素量を測定することで確認した。また、脱気水を用いた浸せき水は、大気中の気体が常時溶解込み、飽和状態に戻ろうとするため、1 日に 1 回新しく作製したものと交換した。

以上の条件のもと、本実験では塩水浸せき試験中の供試体の重量変化を測定することで、浸せき水の溶存空気量が塩分浸透挙動に与える影響について検討を実施した。尚、供試体重量は、1/100g 単位で測定可能な電子天秤を用いて測定した。

3.3 実験結果/考察

試験に用いた浸せき水の溶存酸素濃度 (mg/l) の経時変化を図－18 に示す。水道水は概ね飽和溶存酸素濃度と同等の値を示しており、脱気水は常に不飽和状態にあることを確認できる。このため、脱気水にのみ空隙内に存在する気泡が溶解込むことができるものと思われる。次に、



図－16 塩水浸せき試験の概略図



図－17 溶存酸素計

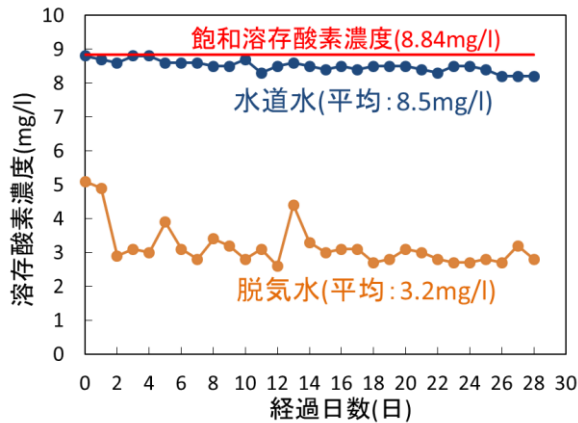


図-18 浸せき水溶存酸素濃度の経時変化

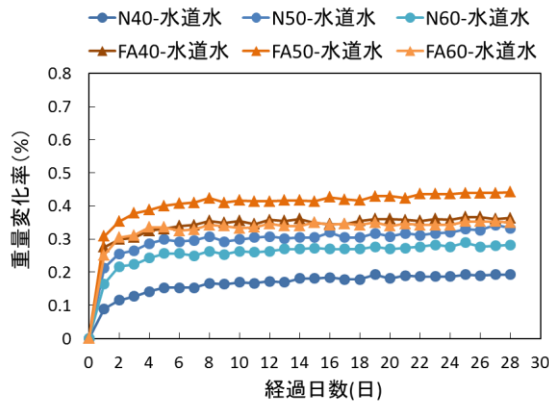


図-19 重量変化率(水道水)

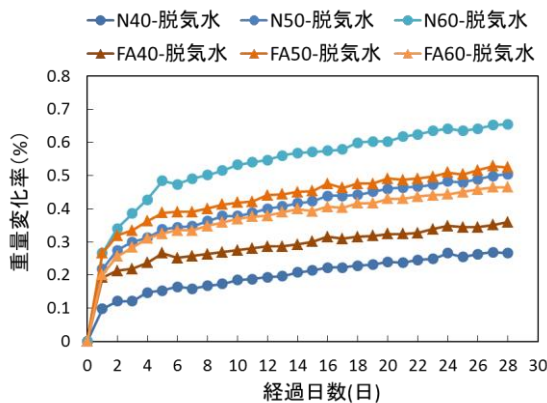


図-20 重量変化率(脱気水)

浸せき試験中の重量変化率を図-19及び図-20に示す。結果を見ると、浸せき開始初期の重量変化率は水道水、脱気水共に約0.3%を示しており、浸せき水の溶存空気量に依らず同様の吸水性状を示している様に見受けられる。このため、吸水初期の挙動は気泡による抑制よりも、毛管張力による浸透が支配的であったのではないかと考えられる。ただし、浸せき開始までにエポキシを塗布する

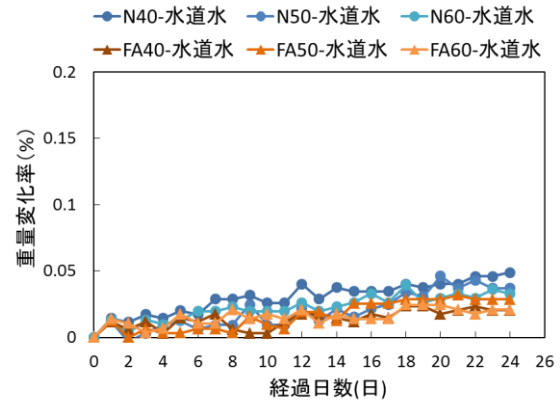


図-21 7日目以降重量変化率(水道水)

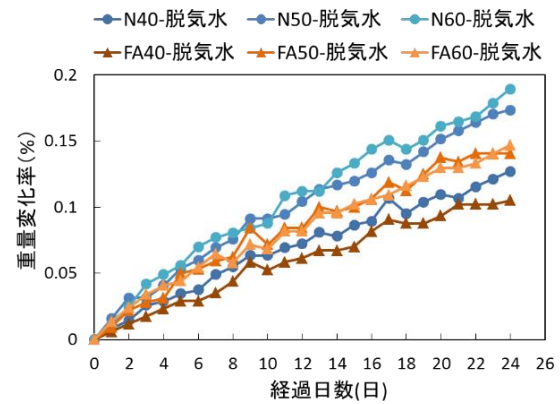


図-22 7日目以降重量変化率(脱気水)

期間があったため、この際に表層付近が乾燥したことが影響している可能性がある。そこで、気泡による抑制効果を明確にするため、浸せき7日目以降の重量変化率に着目して再度整理した結果を用いて考察する。7日目以降の重量変化率を図-21及び図-22に示す。結果を見ると、水道水と脱気水の重量変化率に明確な差異が表れていることを確認できる。特に脱気水を用いた場合には、空隙内に存在する気泡が脱気水中に溶け込んだことで気泡による抑制が働かなかったものと考えられる。このことから、セメント硬化体においても、気泡による浸透の抑制機構が働いている可能性は極めて高いのではないかと考える。さらに、7日目以降の重量変化率は、フライアッシュを用いた方が小さくなっており、フライアッシュを用いることで液状水の浸透に対する抵抗性が向上していることが分かる。この差が物理的もしくは化学的によどのような機構により生じているかは今後検討することとする。

以上より、セメント硬化体においても気泡による浸透抑制機構が働いていることを確認した。このため、気泡による抑制機構がコンクリート中で生じる液状水の停滞現象の支配要因である可能性が高いと考えられる。

4. まとめ

本研究は、移流による液状水の浸透が停滞する機構を解明することを目的に検討を実施した。以下に得られた成果をまとめる。

- (1) マイクロテクノロジーの分野で用いられるガラス製マイクロ流路を用いて液状水の浸透試験を実施した結果、流路内が乾燥している状態では、流路の形状に依らず急激な浸透が生じることを確認した。これは、絶乾状態におけるコンクリート空隙内の液状水の浸透を模擬しているものと考えられる。
- (2) さらに、流路内の任意の箇所に液状水を配置して浸透試験を実施した結果、流路内に液状水が存在しても浸透の抑制は見られなかった。このことから、流路内における液状水の存在位置が重要であることが示唆された。
- (3) 流路の交差部に気泡や不飽和領域が存在するように液状水を配置して試験を実施した結果、壁面にデッドエンドのインクボトルを有し、且つ主経路とインクボトルの交差部に気泡が存在することで液状水の浸透が大幅に抑制され、試験期間内では液状水の浸透が停滞していることを確認した。
- (4) 気泡による液状水の浸透抑制がセメント硬化体でも生じているかを確認するために、溶存空気量を変化させた浸せき水を用いて浸せき試験を実施した。その結果、水道水と脱気水の吸水挙動に明確な差異が認められた。これは、脱気水を用いたことで空隙内の気泡が脱気水中に溶解したことに起因しているものと思われる。このことから、セメント硬化体

においても気泡による抑制が作用しているものと推察した。以上より、移流による液状水の浸透は、空隙内に存在する気泡により大幅に抑制されているものと考えられる。

参考文献

- 1) 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治: 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.803-808, 2010
- 2) 中村兆治, 酒井雄也, 岸利治: コンクリートへの塩化物イオン浸透停滞の機構に関するガラス製マイクロ/ナノ複合チップを用いた光学的実験による検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.841-846, 2013
- 3) 志村雅仁, 岸利治, 鎌田知久: 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限様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
- 4) 岡崎慎一郎, 浅本晋吾, 岸利治: 分子シミュレーションによる微小空隙中の液状水挙動の検証, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.3, pp.311-321, 2009
- 5) 鎌田知久, 岸利治: 微小空隙に存在する液状水が移流による塩分浸透に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.849-854, 2016
- 6) 北森武彦, 庄子習一, 馬場嘉信, 藤田博之: マイクロ化学チップの技術と応用, 丸善株式会社, 2004