

# 論文 微細空隙中を毛管張力により浸入する液状水挙動に関する検討

酒井 雄也<sup>\*1</sup>・岸 利治<sup>\*2</sup>・中村 兆治<sup>\*3</sup>

**要旨:** これまでに著者らのグループが実施した実構造物のコア供試体および室内作製供試体の塩水浸せき試験において、塩化物イオンならびに液状水の浸入が停滞することを示唆する結果を得ている。しかしながら、停滞のメカニズムなどは明らかになっておらず、定量的な評価・予測には至っていない。本研究では液状水の浸入挙動に着目し、マイクロ/ナノテクノロジーの分野で得られている知見ならびに数値解析結果に基づいて、液状水の浸入/停滞メカニズムに関して検討を行ったものである。検討の結果に基づき、これまでに報告されている実験結果と矛盾しない液状水の浸入メカニズムを提案した。

**キーワード:** 液状水, 浸入, 浸透, 停滞, 塩化物, パーコレーション, マイクロ/ナノテクノロジー

## 1. はじめに

塩化物イオンの浸透挙動はコンクリート構造物の劣化進行性状に大きく影響する。塩害に対する現在の耐久性設計において塩化物イオンは、表面塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数が一定として Fick の拡散則に従って浸透すると仮定されている。このため、設計供用年数が長期となる構造物においてはかぶりが数十 cm を超える設計となる。しかしながら実際には、コンクリート中への塩化物イオンの浸透が上記仮定に基づく計算結果を大きく下回るケースが知られている<sup>1)</sup>。

これまでに大城<sup>2)</sup>や杉山<sup>3)</sup>、高橋ら<sup>4)</sup>が実施した、竣工後 1.7 年～8.5 年にかけて実構造物から採取されたコンクリートコアの分析により、上記期間内では塩化物イオンの分布が急勾配を保ったまま深部に移動しないことが確認されている。この結果は、塩化物イオンは拡散により移動するというこれまでの知見と明らかに反するものである。また Takahashi et al.<sup>5)</sup>が実施した、実構造物から採取したコア試験体ならびに室内供試体の塩水浸せき試験において、同様に塩分浸透が停滞すること、また塩分浸透深さと割裂後目視確認された液状水の移動可能な領域がほぼ対応することが示されている。上記は、当該コンクリートにおいて、塩化物イオンの移動が液状水の浸入領域に支配されることを示唆する結果である。

上記のような塩化物イオンの停滞挙動を考慮することができれば、コンクリート構造物の耐久設計の大幅な合理化が期待できる。また停滞現象の十分条件が明らかになれば、停滞現象の生じるコンクリートを意図的に作製することで、高いバリア性能を付与することも可能である。しかしながらコンクリートの分野では、塩分や液状水の浸入に関してはマクロな観点からの検討しかなされておらず、実際にどのように浸入しているかに関しては不明な点が多い。本論文は、緻密なコンクリートにお

ける塩分の浸透が液状水の浸入領域に限定されているというコンセプトに基づき、液状水の浸入に着目して検討を行ったものである。まず次章で、マイクロ/ナノテクノロジーの分野における液状水挙動に関する知見をまとめ、微細空間における基礎的な液状水挙動を把握する。3 章では著者らの所属するグループにおいてコンクリートを対象に実施された浸潤試験の結果を示し、4 章では数値解析により多孔質体への液状水浸入挙動を検討する。5 章では、2 章で整理したマイクロ/ナノテクノロジー分野における液状水挙動の知見と、4 章で実施した数値解析の結果に基づき、コンクリート内の空隙における液状水の移動メカニズムを検討する。本論文は空隙の連続性や摩擦抵抗のみに着目して液状水挙動を論じたものであるが、塩化物イオンの挙動には化学的な影響も大きいと考えられる。それらの影響に関しては今後検討を行う予定である。

## 2. 微細流路における液状水挙動に関する既往の研究

### 2.1 空隙径と液状水浸入速度

コンクリートの空隙構造の分析手法として、水銀圧入法が広く用いられている。水銀圧入法では式(1)に示す Washburn<sup>6)</sup>の式に基づき、圧入に必要な圧力から空隙径を算出する。

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (1)$$

ただし  $\Delta P$ : 圧力差,  $\gamma$ : 表面張力,  $\theta$ : 接触角,  $r$ : 管の半径である。式より、径の小さい空隙ほど疎水性である水銀の圧入には大きな圧力が必要となるが、コンクリート(親水性壁面)と水の場合、浸入の駆動力である毛管張力は大きくなる。その一方で、式(2)に示す Hagen-Poiseuille 式によれば、摩擦抵抗は細径の管ほど大きくなり、結果として直線単管では細径の方が水の移動

\*1 東京大学 生産技術研究所 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)

\*3 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻(正会員)

速度は小さくなる。

$$\Delta P = \frac{8\mu LV}{r^2} \quad (2)$$

ただし  $\Delta P$ : 摩擦抵抗による圧力損失,  $\mu$ : 粘性係数,  $L$ : 液状水浸入距離,  $V$ : 管内平均流速である。直線単管では高さ 5nm というナノチャネルにおいても Washburn 式と Hagen-Poiseuille 式が成立することが Tas ら<sup>7)</sup>によって実験的に確認されており, 移動距離は時間の平方根に比例する。

## 2.2 液状水の浸入に対する抵抗因子

親水性の壁面を有するコンクリート空隙中には, 毛管力によって液状水が浸入するが, これに対して種々の抵抗が作用する。支配的なのは式(2)に示す摩擦抵抗である。また, 壁面の形状に変化があった場合, 液状水の接触角がその形状に応じた角度に達するまで前進できない“ピン止め効果<sup>8)</sup>”が生じる。これにより例えば図-1に示すような管路径の拡大部においては, 気液界面と壁面間の接触角が  $90^\circ$  となる。この場合, 式(1)より気液の圧力差が 0 となり, 液状水の浸入が一時的に停止しうる。他に気泡の巻き込みによっても, 一時的に浸入速度は低下する<sup>9)</sup>。また Andersson ら<sup>10)</sup>によって示されたように, 管路の合流部分においては気泡, 空気存在により一方の流路が閉塞し, 液状水の流入経路が一時的に減少する。以上のように, 複雑なネットワーク構造を有する空隙中においては, 様々な要因により液状水の侵入は阻害されることになる。ただし上記要因による液状水の浸入停滞は一時的であり, 空隙隅部の Corner flow や壁面表面を覆う Film flow により液状水は浸入し続ける<sup>11)</sup>。これにより, 長期的には不飽和部分が減少し, ピン止め効果等が消失してバルク部分の液状水が再び動き出す。

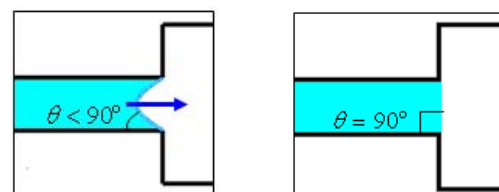
また乾燥過程においては Corner flow による液状水の移動により, 径の小さい流路において急激に乾燥が進行するという結果<sup>12)</sup>も報告されており, 「水分の消失は太径の空隙から」という熱力学に基づく捉え方が必ずしも正しくないことが示されている。

## 3. 浸潤試験結果

筆者の所属する研究グループにおいて実施された, 浸潤試験の結果を例に液状水の浸入挙動を整理, 解釈する。試験では護岸構造物から採取された  $\phi 10\text{cm}$  のコアの, 深部 10cm を 4 分割した供試体を用いている。供試体の浸潤面以外をエポキシ被覆し, 濃度 10% の塩水中に水平に静置されている。図-2 (a)の左側には浸潤による供試体の重量増加量<sup>13)</sup>を示す。時間の経過に伴い, 重量の増加率が減少している。一方(a)の右側は横軸を時間の平方根として描き直した結果であるが, F2 では直線状に重量が増加している。他のケースにおいても, 初期に大きく増加するものの徐々に傾きが減少し, ほぼ平行して重量が増加していることが確認できる。毛管張力による駆動力(式(1))と摩擦による抵抗(式(2))から, 直線単管における液状水の浸入距離は式(3)で表される。

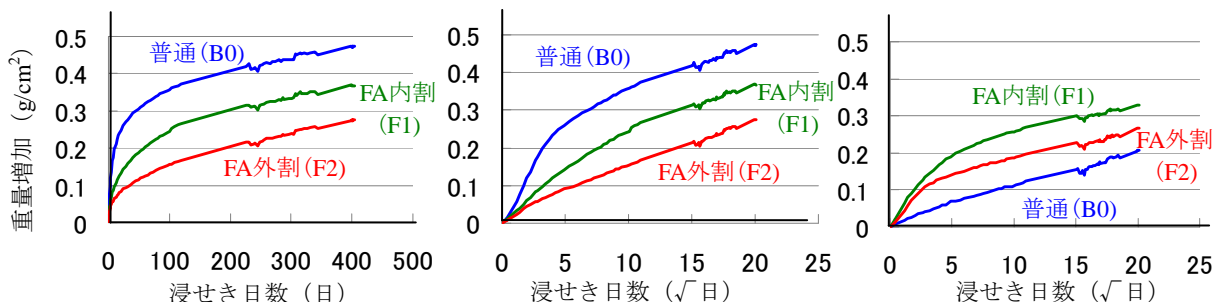
$$L = \sqrt{\frac{r\gamma \cos \theta}{2\mu} t} \quad (3)$$

上式で示されるように, 摩擦抵抗により浸入距離は時間の平方根に比例するようになることから, 図-2(a)に示すコンクリートコアへの液状水浸入においては, 摩擦抵抗が支配的であると考えられる。図-2(b)は同一構造物の異なる高さから採取されたコアの測定結果であるが, (a)との比較より, コアの採取高さが異なると, 配合による挙動の傾向が異なっていることがわかる。例えば平均満潮面から 1.5m の高さでは, F1 や F2 と比較して B0 の重量増加が最も大きい, 1.0m の高さでは B0 は最も小さい。また同一高さから採取されたコアでは, 配合によらず後半の重量増加の傾きが一致している。一方, 図-3は室内で打設された水セメント比 40~70% のコンクリー



(a) 気液圧力差による浸入 (b) 気液圧力差の消失

図-1 管径変化部でのピン止め効果による停滞



(a) 平均満潮面から 1.5m の高さ (Islam, et al.<sup>13)</sup> の図を加筆, 修正)

(b) 平均満潮面から 0.5m の高さ

図-2 実構造物から採取されたコアの浸せき試験における重量増加測定結果

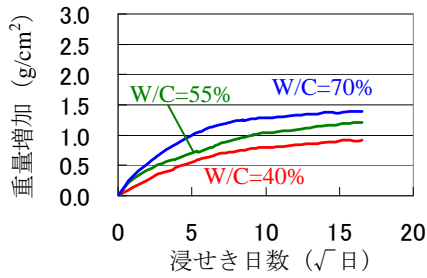


図-3 室内作製供試体の重量増加

ト試験体に対して Islam, et al.<sup>13)</sup>と同様の試験を実施した結果であるが、時間の平方根に比例せず、下回る結果となっている。これは、十分に供試体が乾燥する前に浸せき試験を開始したため、内部に多量の水分が残存していたことが主要因であると考えられるが、2.2 で述べた他の因子が影響している可能性も考えられる。しかしながら、重量増加が長期にわたる一方で、肉眼により確認された液状水浸潤フロントと塩化物イオンの浸透は停滞し、それらの深さがほぼ一致することが Takahashi et al.<sup>5)</sup>によって示されている。またフライアッシュを混入した構造物では、塩化物イオンは急な勾配を維持したままで拡散挙動は見られないことも報告されている<sup>4)</sup>。

#### 4. 空隙特性と液状水挙動との関係の数値解析的検討

##### 4.1 流入量に制限のある複数管路への浸入解析

径の異なる管路への流入挙動を把握するための簡易的な数値解析を実施した。解析では、液状水の流入する空間に径の異なる直線管路がつながっており、そこへ毛管張力により液状水が浸入することを想定している。解析モデルのイメージを図-4 に示す。解析では、空間への液状水の流入量に制限があるものとし、3つの管のうち最も抵抗の小さいものに液状水が浸入するものとした。浸入抵抗の大きさは式(1)と式(2)を変形し、 $V = \Delta L / \Delta t$ として以下の式を導き、 $\Delta L$ の大小により判断した。

$$\Delta L_i = \alpha \frac{r_i}{L_i} \Delta t \quad (4)$$

ただし、 $\alpha = 2\gamma \cos \theta / 4\mu$ であり、 $i$ は管路番号を示し

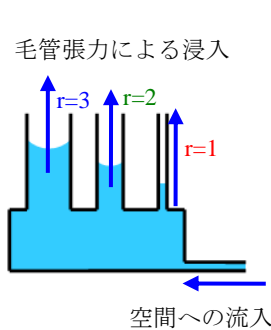
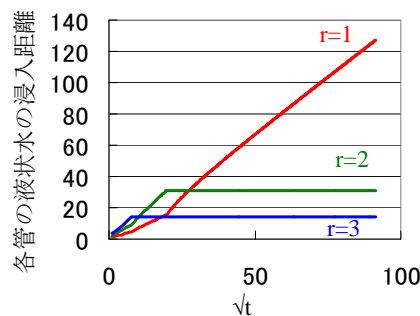
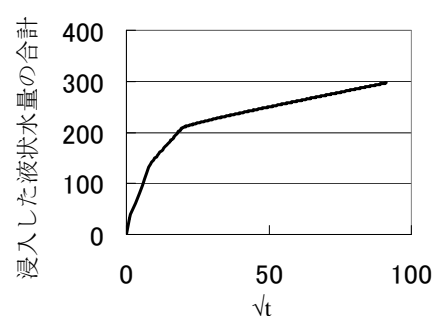


図-4 解析モデルのイメージ



(a)管径による浸入挙動の違い



(b)管路に浸入した液状水量の合計

図-5 流入量に制限のある複数管路への浸入解析結果

ている。ある時点 $t$ での $\Delta L_i$ をそれぞれの管路で算出し、最も大きな $\Delta L_i$ の管路における浸入が最も容易であるとして $L_i^{t+\Delta t} = L_i^t + \Delta L_i$ とするという処理を繰り返した。また流入距離 $L_i$ に $r$ を直径とする円の面積を掛けることで、浸入した液状水の体積に換算した。解析に必要なパラメータは簡易的に $\alpha=1$ 、 $\Delta t=1$ 、 $r_1=1.0$ 、 $r_2=2.0$ 、 $r_3=3.0$ 、 $L_i^0=1.0$ とし、各管の流入体積が100となった時点でそれぞれにおける浸入が停止するものとした。解析の結果を図-5 に示す。(a)は各管における流入距離を示したものである。径の大きい管( $r=3$ )においては初期に急激に浸入し、その後流入体積が100に達して停止に至った。太管への浸入停止後には径の小さな管( $r=2,1$ )への浸入量が増加し、浸入が続いた。(b)には3本の管路に浸入した液状水の体積を合計したものを示す。図のように、初期には太径の管路からの流入により急激に液状水量が増加しているが、徐々に細径の管路における流入が支配的となり、それに伴い液状水量の増加率は減少している。

上記の簡易的な解析結果から、様々な径の空隙を有する多孔質材料中の液状水挙動に関して、以下のような考察ができると考えられる。まず液状水は径の大きな空隙に迅速に浸入し、短期間で満たす。その後順次、径の小さな空隙における浸入が支配的になっていくものと考えられる。今回の解析では一律に、各管の流入体積が100となった時点で浸入が停止するものとした。水銀圧入法による空隙径分布の測定結果<sup>4)</sup>によると、インクボトルの影響を含む、圧入抵抗の大きい微細空隙の体積は粗大な空隙を大きく上回る。よって、実際にはさらに、粗大な空隙は短期間に満たされ、その後の微細な空隙の飽和には時間を要するものと考えられる。実験報告との比較・考察は次章で行う。

##### 4.2 粗大空隙への浸入を想定したパーコレーション解析

ランダムに分布した移動可能な連続領域中を、液状水が浸入していくことを想定した解析を実施した。このような“パーコレーション”解析は、不均質体への浸入挙動の解析によく用いられており、コンクリートにも適用されている<sup>14)</sup>。本解析は4.1で示したような、粗大空隙中の液状水移動が支配的となる、比較的短期間での液状水

浸入を想定している。解析ではまず、100×100mm の領域に直径 0.2mm の円形要素を千鳥状に配置した。要素数は 258000 である。その後、所定の割合となるように、①粗大空隙要素 Ep、②微細空隙要素 En にランダムに分類した。ここで、本解析では比較的短時間での液状水浸入挙動を検討するため、浸入に時間のかかる En には浸入しないものとした。以降では、Ep と全要素数との比率を空隙率と呼ぶ。

コンクリートを対象とした解析ではさらに③骨材要素 Ea を配置し、液状水は骨材要素を移動できないものとした。細骨材は直径 2mm、粗骨材は直径 15mm の円状に Ea を配置することで表現した。また粗大な空隙を有する遷移帯の影響を表現するため、骨材は Ep に囲まれているものとした。液状水は解析領域左端部から浸入し、液状水が浸入した要素を Ew とする。Ew が接している場合には Ep を Ew に変化させるという処理を行うことで、連続粗大空隙中への液状水浸入を表現している。解析においては、ある時点で Ew と接している Ep を全て Ew に変化させるという作業を 1 ステップとし、Ew に接する Ep が存在しなくなるまでこれを繰り返した。解析のイメージを図-6 に示す。境界は上下で連続しており、上端

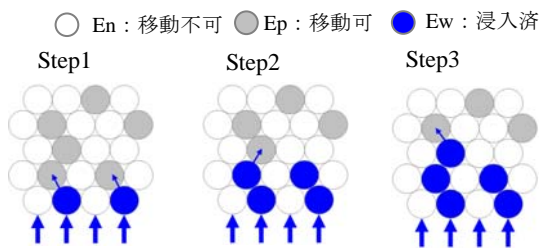


図-6 解析プロセス概要

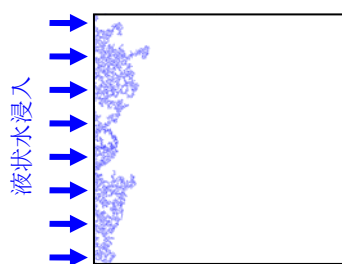


図-7 ペーストモデルを用いた解析結果例 (空隙率: 48%)

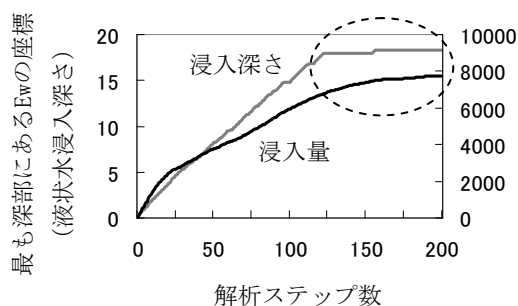


図-9 液状水の浸入プロセス(空隙率 47%)

の要素は下端の要素と接しているものとして処理される。ペーストとコンクリートを想定した解析モデルで、空隙率ならびに骨材量をパラメータとして検討を行った。各ケースで Ep や En および骨材の配置をランダムに変化させて 3 回ずつ解析を実施している。

#### 4.3 ペーストモデルへの液状水浸入

空隙率をパラメータとし、全要素の 30~60% の要素を粗大空隙要素 Ep として解析を実施した。解析により得られた 2 次元的な液状水分布の例を図-7 に示す。図中で色の付いた要素が、液状水の到達した要素である。図-8 は液状水が到達した要素 Ew を深さごとにカウントし、その分布を示したものである。検討の結果、空隙率が 48% より小さいケースでは、液状水浸入は停止に至り、50% 以上では 3 回の解析全てで液状水が右端部に達した。本検討のような三角格子のサイト過程における浸透閾値は厳密解で 0.5 であり<sup>15)</sup>、上記結果とほぼ対応している。

図-9 は空隙率 47% のケースにおいて最も深部に存在する Ew の位置、すなわち浸潤深さと、Ew の要素数、すなわち液状水の浸入量と解析ステップの関係を示したものである。空隙率が閾値を下回るため、深さ方向への浸入は解析ステップ 121 でほぼ停滞に至っているが、その後も液状水浸入量が増加する結果となった。これは、深さ方向の浸入は停滞した場合でも、浸潤フロント以浅での浸入が継続しているためである (図-10)。

#### 4.4 コンクリートモデルへの液状水浸入

骨材要素を配置し、骨材量をパラメータとしてコンクリートを想定した検討を実施した。細骨材と粗骨材の面積比は等しくなるように配置されている。2 次元的な液状水分布の解析例を図-11 に、また深さ方向の液状水分

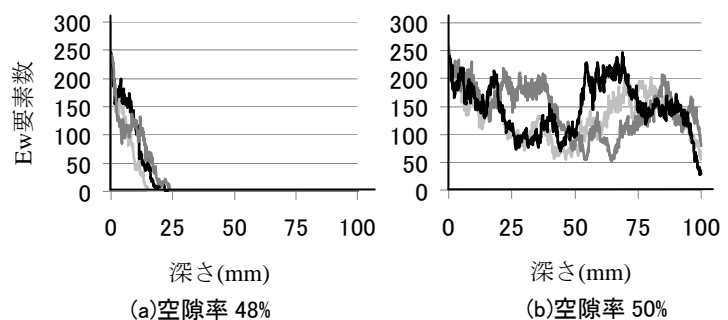
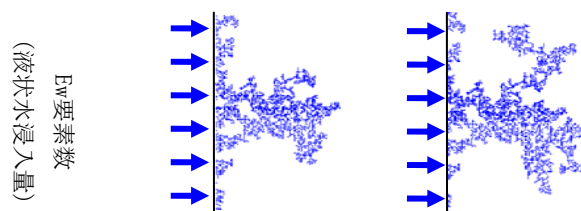


図-8 液状水が到達した要素 Ew 数の分布



(a)解析ステップ 121 (b)解析ステップ 200

図-10 浸入深さ停滞後の液状水の移動(拡大図)



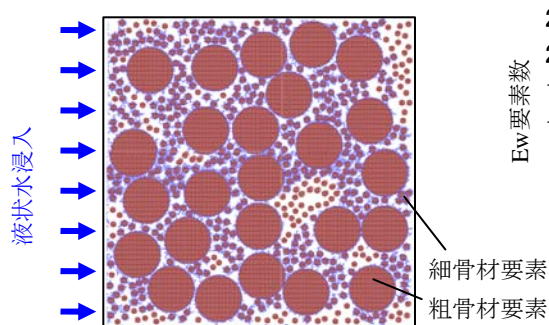


図-11 コンクリートモデルを用いた解析結果例

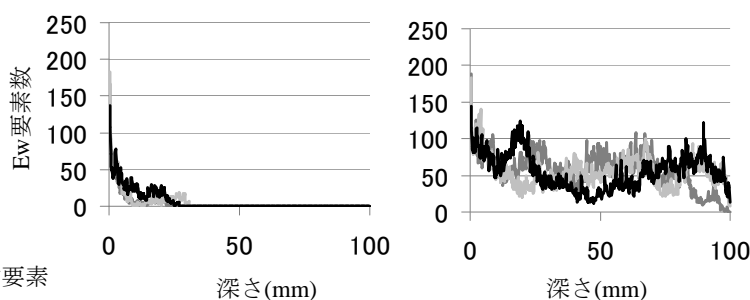
布を図-12に示す。ペーストモデルでは液状水の浸入が停止していた空隙率30%のケースにおいて、面積率40%の骨材要素を配置した場合には、同様に停滞に至ったが、骨材面積率50%では液状水が右端部に達する結果となった。骨材遷移帯に粗大な空隙が存在すると仮定した場合には、骨材の配置により浸透閾値が大きく減少することを数値解析的に確認した。

#### 5 解析結果に基づく液状水浸入挙動の検討

4.1において、径の異なる直線管路が液状水の流入する空間と連結されている場合、まず径の大きな管が満たされ、順次細径の管への浸入が支配的になることを解析的に確認した(図-5(a))。また細径管への浸入が支配的となるほど、浸入液状水量の傾きが減少した(図-5(b))。図-2,3における重量増加の傾きの減少も、同様のメカニズムに起因している可能性が高いと考えられる。

また4.2のパーコレーション解析の結果、短期間で生じる液状水浸潤は、粗大空隙の面積率が閾値以下であれば停滞に至ることを解析的に示した。岡崎ら<sup>16)</sup>により、深さ方向への浸潤挙動が試験14日目にはほぼ停滞に至っていること、またTakahashi et al.<sup>5)</sup>によりコンクリート構造物では約7年間にわたって液状水の浸入が停滞していることが報告されている。以上は、連結した粗大空隙は短期間で満たされ、その後の微細空隙における深さ方向への浸入には長期間を要することを示していると考えられる。また上記より、両報告における粗大空隙の存在確率は閾値以下であったものと考えられる。

4.2の解析において、深さ方向への液状水浸入が停滞した場合でも、液状水フロント以浅の粗大空隙への浸入が継続するという挙動を確認した。これに加えて、ある程度粗大空隙が満たされた後には、図-5で示したような細径の管への流入が支配的となるために、長期に渡って重量増加が継続したものと考えられる。この場合、粗大空隙における液状水浸入が停滞した後には、より深部に向かって微細空隙中を移動するという挙動が生じると考えられ、実際、目視確認された液状水フロントよりも深部に塩化物イオンが浸入しているという報告<sup>16)</sup>があ



(a)骨材面積比 40%

(b)骨材面積比 50%

図-12 液状水が到達した要素 Ew 数の分布

る。これは目視確認できるのは粗大空隙を満たした液状水であり、塩化物イオンは微細空隙に浸入した液状水中を移動しているためであると考えられる。

また図-8において、空隙率が閾値以下である場合には液状水の分布は急な勾配を示している。3章で述べたように、塩化物イオンの分布が急な勾配を保ったまま長期間拡散しないという挙動が高橋ら<sup>4)</sup>によって報告されているが、化学的な固定などに加えて、液状水量の分布が影響している可能性があると考えられる。

図-2(a)右図や(b)において、初期に異なっていた傾きが減少し、最終的に全ケースの曲線がほぼ平行となっていた。これまでの考察より、B0では最初に粗大な空隙が満たされた後に、微細な空隙への液状水浸入が支配的になり、一方F2では、液状水が移動可能な領域に粗大な空隙がほとんど存在せず、初期から微細空隙への浸入が支配的であったことが原因として考えられる。水銀圧入法により測定された微細空隙径の分布は、配合によらずほぼ同等であることがTakahashi et al.<sup>5)</sup>によって報告されているが、水銀圧入法で把握することが困難な粗大空隙の影響により、初期の浸潤挙動が異なっている可能性がある。また図-2より、初期の浸潤挙動と配合との対応は見られないこと、微細空隙への浸潤が支配的と考えられる段階での傾きとコアの採取位置に対応が見られることから、浸潤挙動には表層品質の影響が大きいものと考えられる。すなわち、表層付近に粗大空隙が多く存在する場合には、図-2のB0のように初期の浸入深さが増大する。また表層の微細空隙径が小さくなれば、4.1の解析における管路の径が減少し、図-5(b)中のグラフの傾きが減少することとなる。

深さ方向への液状水移動が停滞し、より摩擦抵抗の小さい空隙に水が浸入している場合でも、2.2で述べたように、Corner flowやFilm flowの存在により、厳密には深さ方向への液状水は、完全には停止しない<sup>11)</sup>。液状水が完全に停止する条件としては、液状水の移動可能な空間が不連続であることが挙げられる。この場合には、溶脱等による組織の変化が生じない限りは長期的にわたって液状水は停滞するものと考えられる。しかしながら、

コンクリート中の空隙ネットワークが完全な不連続部分を有することは考えにくい。今後、長期的な液状水挙動に関して、実験的な検討・検証を行う予定である。

## 5. おわりに

本論文では毛管張力による、コンクリート中への液状水浸入挙動のメカニズムを検討した。以下に結果をまとめる。

- (1) マイクロ/ナノテクノロジー分野の文献を調査し、空隙の形状や空気存在により、コンクリート中の液状水浸入が一時的に停止する可能性を示した。
- (2) 浸せき試験において、内部が乾燥したコンクリート供試体の重量増加が時間の平方根に比例することを確認した。これは、液状水の浸入に対して摩擦抵抗が支配的であることを示している。
- (3) 径の異なる管路への浸入挙動を数値解析により検討した。その結果、径の大きな管が早期に満たされ、順次径の小さな空隙における浸入が支配的になること、またこの場合、流入量は径に応じて徐々に減少することを解析的に示した。
- (4) 粗大空隙がランダムに分布するとして、短期間での液状水浸入挙動を想定した解析を実施した。その結果、粗大空隙の存在確率が閾値以下であれば停滞に至ること、また深さ方向への浸透が停滞した場合でもフロント以浅では浸入が継続することを確認した。
- (5) パーコレーション解析の結果、液状水浸潤が停滞した場合、その分布は比較的急な勾配を有することを確認した。塩化物イオンの浸入がある深さで急勾配を維持したまま停止するという挙動に上記が影響している可能性がある。
- (6) 短期的な液状水の浸入挙動には、内部以上に表層の品質が大きな影響を与えているものと考えられる。

## 謝辞

本論文は、東京大学生産技術研究所の火原彰秀准教授と TWENTE 大学の Prof. Jan. C. T. Eijkel, Dr. Niels Tas との議論に基づき執筆されたものです。また議論のための渡航は、財団法人生産技術研究奨励会の三好研究助成により支援していただきました。ここに記し謝意を示します。

## 参考文献

- 1) Takewaka, K, et al. : Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments, ACI SP109-17, pp.381-400, Aug.1988
- 2) 大城良信ほか：海洋環境化における石灰灰を使用した RC 構造物の施工報告, コンクリート工学年次論

文集, Vol.23, No.1, pp.789-794, 2002

- 3) (社) 土木学会 電力 FA コンクリート研究会：平成 20 年度フライアッシュを利用するコンクリートの耐久性に関する調査研究, pp.44-54, 2009.3
- 4) 高橋佑弥ほか：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
- 5) Takahashi, Y., et al. : Chloride ion ingress and its dependence on liquid water penetration in fly-ash concrete, Proceedings of the 2nd International Conference on Durability of Concrete Structures ICDCS2010, pp.285-292, Sapporo, 2010.11
- 6) Washburn E.W. : The Dynamics of Capillary Flow, , Physical Review, Vol. 17(1921), pp.273-283, 1921
- 7) N.R. Tas, et al. : Capillary filling speed of water in nanochannels, Applied Physics Letters 85, pp.3274-3276, 2004
- 8) David Quere, et al. : 表面張力の物理学—しずく, あわ, みずたま, さざなみの世界—, 吉岡書店, 2003
- 9) Thamdrup, L. H, et al. : Experimental investigation of bubble formation during capillary filling of SiO<sub>2</sub> nanoslits, Applied Physics Letters 91, 163505, 2007
- 10) H. Andersson, et al. : Micromachined filter-chamber array with passive valves for biochemical assays on beads, Electrophoresis 22 , pp.249-257, 2001
- 11) A. Mazouchi, et al. : Thermocapillary migration of long bubbles in polygonal tubes. I. Theory, Phys. Fluids 13, pp.1594-1600, 2001
- 12) Eijkel, J.C.T., et al. : Strongly accelerated and humidity-independent drying of nanochannels induced by sharp corners. Physical Review Letters, 95 (25), 256107, 2005
- 13) Islam Md. S., et al. : Durability Design of Reinforced Concrete Based on Reliability of Barrier Function of Cover Concrete, 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, RILEM Proceedings PRO 70, pp. 305-312, vol. 1, October 2010
- 14) 木下勝也, 魚本健人：コンクリート中の物質移動に関するパーコレーション法による検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.1, pp.263-268, 1998
- 15) 小田垣孝：パーコレーションの科学, 裳華房, p.25, 1993
- 16) 岡崎慎一郎ら：コンクリート中の液状水浸潤および空隙構造が果たす塩化物イオン拡散への影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.66, No.05, pp.543-544, 2011