

# 構成材料の空間的特性を考慮したコンクリートの拡散性状のモデル化

The Modeling of Deffusion within Concrete Considering the Spatial Property of Composite Materials

加藤 佳孝\*  
Yoshitaka KATO

## 1. はじめに

コンクリート中の物質移動現象はコンクリート構造物の耐久性能を支配する主要な現象であり、これまでに、数多くの研究成果が報告されている。例えば、塩化物イオンの浸透に関する研究では、濃度拡散、移流、固定・遊離化、擬似吸着などの全ての現象を再現しモデル化している場合<sup>1)</sup>やこれら全ての現象を見かけの拡散として考慮してモデル化している場合<sup>2)</sup>など様々である。しかし、何れのモデル化もコンクリートの移動特性を示す指標（拡散係数など）は実験結果を用いている場合がほとんどであり、空隙量や代表空隙径との関係から一般化を試みている研究も存在するが、未だ、コンクリートの構成材料を適切に評価したモデル化がなされていないのが現状である。これは、コンクリート空間を構成している空隙、セメント、骨材などの間には10<sup>6</sup>程度のスケールギャップがあるために、全てを考慮することが困難であるためと考えられる。

本研究は、コンクリート中の物質移動を支配する要因を大きく空間的特性と化学的特性にわけ、このうち空間的特性のみを考慮した物質移動（拡散性状）のモデル化を、構成材料を考慮して実施する。

## 2. コンクリートの拡散性状のモデル化

### 2.1 拡散性状のモデル化

本研究では、コンクリートの拡散性状を式(1)に示されるFickの第2法則に基づくものとする。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、c：濃度、D：拡散係数

式(1)に基づいて構成材料を考慮したモデル化を行う

\*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

ためには、構成材料毎の拡散係数を求める必要がある。本研究では、構成材料の拡散係数は式(2)に示すように、対象とする材料の空隙特性によって表現されるとする<sup>3)</sup>。

$$D_i = \frac{\epsilon_i}{\tau_i^2} D_m \dots \dots \dots (2)$$

ここに、D<sub>m</sub>：分子拡散係数、ε：空隙率、τ：屈曲度、i：材料の違い

以上の仮定の基で拡散性状のモデル化を行うためには、各材料の空隙特性（空隙率、屈曲度）を定量的に表現する必要がある。本研究では、コンクリートをセメントペースト、遷移帯、骨材の3相から構成されると仮定しモデル化を試みる。

### 2.2 空隙構造のモデル化

図1は水セメント比(W/C)0.5のセメントペースト、材齢28日における空隙径分布を水銀圧入式ポロシメータにより測定した結果である。水銀圧入式ポロシメータは、セメント硬化体の空隙径分布を測定する方法として広く用いられているが、反面、インクボトル効果の影響により測定

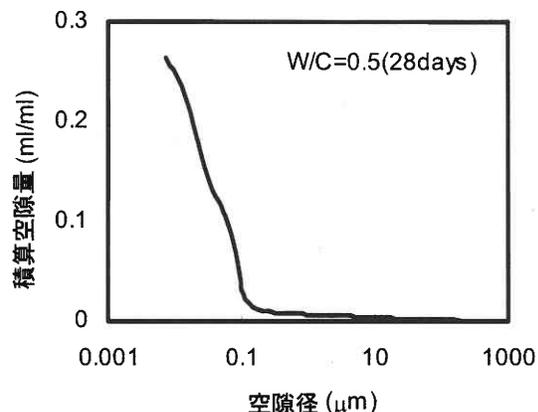


図1 水銀圧入式ポロシメータによる測定例

研究速報

結果が実際の空隙径分布を再現していない可能性があるとの指摘がある。一方、セメント硬化体の物理的特性を表現するために、セメントの水和反応過程のビジュアルシミュレーションを試みている研究も行われているが<sup>4)</sup>、一般化されるには至っていないのが現状である。

以上の現状を鑑み、本研究ではセメント硬化体の空隙構造を空隙のランダム配置により表現し、空隙率は水銀圧入式ポロシメータの測定結果を用いることとする。この時、セメントペーストに関しては、W/Cを考慮した空隙のランダム配置とする。すなわち、セメント粒子は図2に示すように、W/Cから決定される水とセメントの割合を粒子毎に満足し(図中灰色:セメント粒子, 白色:水), この1つのユニットが規則正しく配置され、セメント粒子は限られたユニット内をフレッシュ時に動くことができる。その後、水和反応の進行とともに水和生成物を図中白色の領域にランダムに生成するものと仮定する。厳密には、セメントの水和反応により内部生成物が水和以前のセメント粒子内部に形成され、ゲル空隙や層間空隙といわれる空隙部分が存在するが、本研究ではこれらの空隙を無視し、全ての空隙は水和以前に水および空気が存在していた領域に存在するとした(換算空隙率と称す)。換算空隙率( $V_{con}$ )は、空隙率の測定結果( $V_{mip}$ )、W/C、セメントの密度( $\rho_c$ )を用いて式(3)により、1ユニットの一辺の長さ( $l$ )はセメント粒子を球、1ユニットを立方体で表現すれば、セメントの粒子半径( $r_c$ )、W/C、セメントの密度( $\rho_c$ )を用いて式(4)により求められる。

$$V_{con} = V_{mip} \left(1 + \frac{C}{W\rho_c}\right) \dots\dots\dots(3)$$

$$l = r_c \sqrt{\frac{4}{3}\pi(\rho_c \frac{W}{C} + 1)} \dots\dots\dots(4)$$

例えば、W/C 0.5, 28日水中養生後の普通セメントペーストの水銀圧入式ポロシメータによる測定結果が0.26(ml/ml)であった場合は、水和以前に水および空気が存在していた領域の空隙率が1(ml/ml) → 0.43(ml/ml)に変化したとするものである。なお、既往の研究<sup>5)</sup>より遷移帯の空隙率は同一W/Cおよび材齢のモルタルの空隙率からセメントペーストの空隙率を差し引いた値とする。

3. 各要素の見かけの拡散係数の算出

3.1 空隙率と見かけの拡散係数の関係

セメント硬化体の空隙率はW/C、材齢などの影響により異なる値を示すため、本手法を一般化するためには、まず空隙率とセメント硬化体全体が示す見かけの拡散係数の

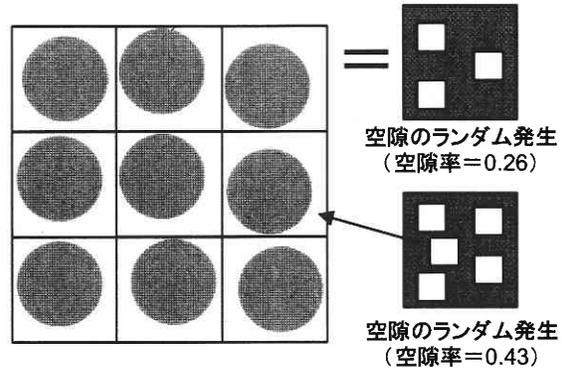


図2 セメントペーストの空隙構造のモデル化の概念図

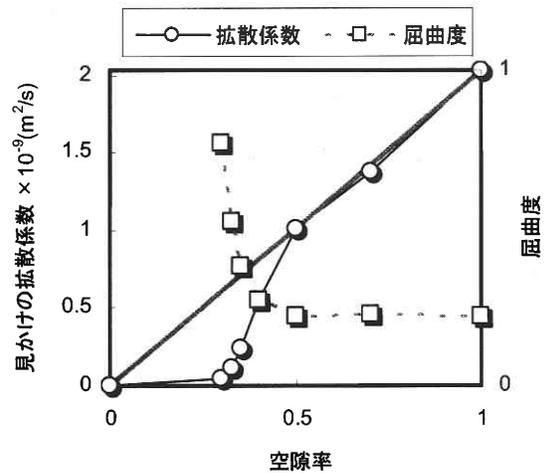


図3 空隙率と見かけの拡散係数の関係

関係を求めておく必要がある。ここでは、空隙部分の拡散係数を塩化物イオンの分子拡散係数 ( $2.03 \times 10^{-9} (m^2/s)$ ) とし、式(1)に従って2次元有限要素法拡散解析により両者の関係を求める。解析対象が空隙と固相で構成されているため、境界から一定の距離における濃度は一定ではない。そこで、解析対象の拡散性状をマクロ的に捉えることとする。すなわち、境界から一定の距離における濃度を平均化し、この濃度変化の平均に対して式(5)で表現される1次元の拡散方程式の理論解を近似させることにより解析対象全体の見かけの拡散係数を算出する。なお、各空隙率に対して100回の計算を行った。算出結果を図3に示す。図3には、算出結果と式(2)から計算できる屈曲度の結果もあわせて示す。これは、空隙構造を空隙のランダム発生によって表現した場合の空隙率と屈曲度の関係を示している。図から明らかのように、空隙率0.3付近から全体としての拡散流れが出現し始め、空隙率0.5付近では屈曲度がほぼ1になっていることがわかる。なお、本解析は2次元で行っているため、詳細な値は現実の3次元空間と

は異なる。図3で得られた空隙率と見かけの拡散係数の関係を、セメントペーストの空隙領域（図2中の白色の領域）および遷移帯に適用する。

$$c(x,t) = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、c：濃度，x：境界面からの距離，D：見かけの拡散係数，t：時間

**3.2 セメントペーストの見かけの拡散係数の算出**

セメントペーストの見かけの拡散係数は、図2中の水と反応以前のセメント粒子（灰色）の範囲における拡散係数を0とし、空隙領域（白色）の拡散係数を水銀圧入式ポロシメータにより得られる空隙率に応じて、図3を用いて決定する。例えば、前述したW/C 0.5、28日水中養生後の普通セメントペーストの場合は、換算空隙率が0.43 (ml/ml)であり、この時の拡散係数は $0.69 \times 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{s)}$ となる。この値を用いて、前節で記述した解析方法と同様の手順によりセメントペースト全体の見かけの拡散係数(Dcp)を算出する。図4に材齢28日におけるW/C 0.4, 0.5, 0.6の測定結果に基づいて、各々の見かけの拡散係数を算出した結果を示す。また、空隙率を変化させた結果を図5に示す。

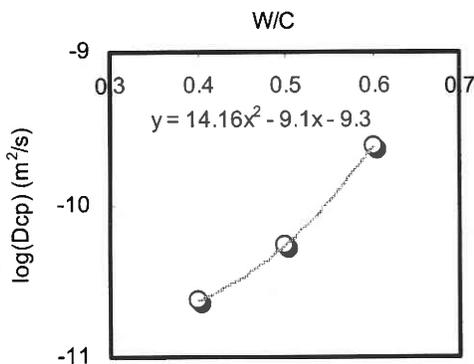


図4 W/Cと見かけの拡散係数の関係（材齢28日）

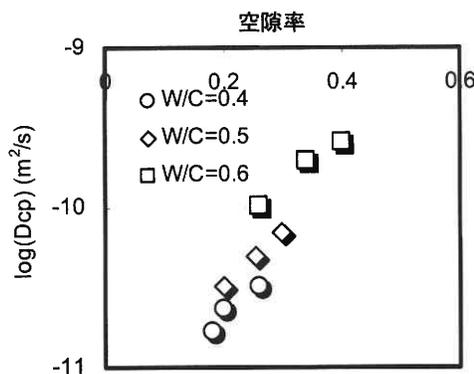


図5 空隙率と見かけの拡散係数の関係

**3.3 遷移帯のモデル化**

遷移帯の見かけの拡散係数は、遷移帯の空隙率に応じて図3の結果より決定する。既往の研究<sup>5)</sup>より、モルタル中の遷移帯の空隙率は細骨材径に依存して変化することが示されているが、ここでは、コンクリートの拡散性状を把握することを目的としているため、簡易的に細骨材の粒度分布に基づき平均遷移帯空隙率を求めた。平均遷移帯空隙率は、約0.38であり図3の関係から細骨材周辺の遷移帯の見かけの拡散係数は $0.43 \times 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{s)}$ となる。

粗骨材周辺の遷移帯は、Wall effectとブリーディングによる影響を考慮して、既往の研究<sup>5)</sup>より空隙率0.52と設定する。この時の見かけの拡散係数は $1.06 \times 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{s)}$ となる。また、粗骨材周辺に形成される遷移帯の厚さは、上面：27 μm(wall effectのみ)、下面：55 μm(wall effect+ブリーディングによる厚さ)、左右面：41 μm(wall effect+ブリーディングによる厚さの半分)とした(表1の配合条件)<sup>5)</sup>。

**4. コンクリートの拡散解析**

コンクリート全体の拡散解析は、これまでの結果を基に図6に示すフローにしたがって行う。解析手法は、セメントペーストの見かけの拡散係数算出方法と同様に2次元有限要素法拡散解析とした。ここで、セメントペーストや骨材と比較して遷移帯の大きさは小さいため、本解析では2次元要素である骨材領域の周囲に1次元要素である遷移帯(遷移帯厚さは考慮する)を張り付ける概念をプログラムに反映させる手法を採用している。材料の配置は、配合に応じた骨材量を乱数発生により配置し、骨材以外の領域をセメントペーストとすることにより一般化させる方法を採用した。浸透の方向としては、構造物の耐久性を考えた場合その殆どが打設方向に対して垂直の方向からの物質の浸透であると考えられることを考慮し、この方向を採用した。また、粗骨材の大きさは平均粒径を用い9 mm (3×3)と

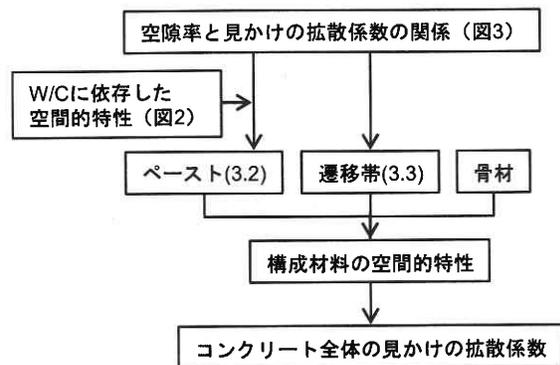


図6 コンクリート全体の見かけの拡散係数の算出方法

研 究 速 報

し、細骨材の大きさは簡易的に 3 mm (1 × 1) とする。

解析の対象としたコンクリートの配合を表 1 に示す。コンクリートの解析結果の一例として、図 7 に浸透面からの距離が 30 mm における濃度分布の平均値の経時変化を示す。なお、図には遷移帯の影響を把握するために、遷移帯の有無に関して計算した結果を記載してある。遷移帯有の結果に対して、遷移帯無の結果は顕著に拡散速度が小さくなっていることがわかる。例えば、開放面からの物質の供給が定常的にあり、物質の濃度が 0.1 となった時に有害であるという場合が存在するとすれば、遷移帯が存在しなければ約 16 年耐えることができるのに対して、遷移帯が存在すると約 4 年しか耐えられないという結果となった。

最後にこれまでの結果を表 2 にまとめる。表中の S-TZ, A-TZ は細骨材周囲および粗骨材周囲の遷移帯を示す。また、各要素の拡散係数をコンクリート全体の見かけの拡散係数で除した結果も記載した。既往の研究<sup>3)</sup>によれば、コンクリートの見かけの拡散係数は空隙量と屈曲度（空隙構造に依存するものを抽出）を用いて表現されている（式 (2) 参照）。ここで、仮定した空隙領域は空隙量 = 1 (ml/ml)，屈曲度 = 1 の状態に相当する。現在、ひび割れを有する鉄筋コンクリートの拡散性状の把握が重要視され、ひび割れ部の取り扱い方法に関して関心が集まっている。ひび割れ部の空間情報は、空隙量 = 1 (ml/ml)，屈曲度 ≥ 1 であり、コンクリートの屈曲度と比べた場合、極めて“1”に近い状態であると考えられる。つまり、本研究の結果よりひび割れ内の拡散係数の最大値は、コンクリート全体の見かけの拡散係数の約 80 倍と設定することが可能となる。

5. ま と め

本研究は、コンクリート全体の拡散性状を、コンクリートをセメントペースト、遷移帯、骨材の 3 相構造と仮定し、それぞれの空隙特性を考慮して拡散係数を算出し、さらに全体の配置特性を考慮することにより表現した。しかし、空隙構造や配置特性はランダム発生、ランダム配置を基本としており、繰り返し計算することである程度の平均的特性を考慮してはいるものの、妥当性に欠けるモデル化であり、セメントの化学反応の特性やコンクリートのフレッシュ性状の特性を考慮したモデル化とすることが必要である。さらに、本研究では実験結果との比較を行っておらず、これに関しても今後検討していく必要があると考えている。

表 1 対象としたコンクリートの配合条件

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
50	47	184	368	803	929

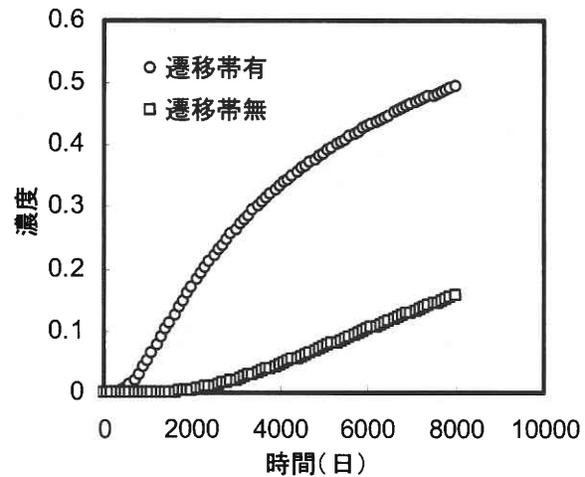


図 7 濃度の経時変化の一例（深さ 30 mm）

表 2 見かけの拡散係数のまとめ

	拡散係数 × 10 <sup>-9</sup> (m <sup>2</sup> /s)	拡散/Con 拡散
細孔領域	2.030	83.3
CP 全体	0.053	2.2
細孔領域(S-TZ)	0.426	17.5
細孔領域(A-TZ)	1.056	43.3
Con 全体	0.024	1

(2002 年 7 月 8 日受理)

参 考 文 献

- 1) 例えば、丸屋剛：コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析手法の構築，東京大学学位論文
- 2) 例えば、塚原絵万：マクロ的アプローチによるひび割れを有するコンクリートの物質移動評価，東京大学学位論文
- 3) 氏家勲：コンクリートの透気係数の定量的検討と密実性評価への適用に関する研究，東京工業大学学位論文
- 4) 例えば、NIST (<http://ciks.cbt.nist.gov/bentz/hydrate.html>)
- 5) 加藤佳孝：遷移帯がコンクリートの物質移動評価に及ぼす影響，東京大学学位論文