

# パーコレーション法によるコンクリート透気性の検討

## Permeation of Concrete by Percolation Method

木 下 勝 也\*・魚 本 健 人\*

Katsuya KINOSHITA and Taketo UOMOTO

### 1. は じ め に

コンクリートの耐久性に影響を及ぼす気体や液体、イオンなどがコンクリート中を移動する現象を論じる場合、様々な要因があげられるが、コンクリート自体の物質特性として、その空隙構造が問題となる。物質移動と空隙構造に関する既往の研究で、物質の移動に関与すると考えられる毛細管空隙量は体積率で十数パーセント、モルタルで二十数パーセントとされ、また透気・透水性などはある一定以上の径と関係が深いとされている。これらの数 nm から数 mm と幅の広い空隙に対して、細孔分布をどのように取り扱うべきか十分な検討は為されていない。

また、空隙構造の指標となる細孔構造の測定には、数 nm から数十 μm までの空隙を測定できる水銀ポロシメータが有効とされている。しかし、水銀ポロシメータは、インクボトル効果などの問題点も指摘されている。

本研究では、パーコレーション法によりコンクリート中の空隙構造を表現し、その空隙構造が移動現象にどのように関与するか、酸素拡散試験により検討を行った。

### 2. パーコレーション法

#### 2.1 マルチスケールネットワークモデル

本研究では、数 nm ～数 mm と幅の広いコンクリート中の空隙構造を表現するために、J. F. Daian らが提案したマルチスケールネットワークモデル<sup>1)</sup>を採用した。マルチスケールネットワークモデル (MSNM) とは、細孔径の大きさに応じて、その細孔径に対応する何段階かのステージを用意し、各ステージを「スケーリング則」ならびに「繰込み群」を用いて重ねあわせることによって、異なる大きさの空隙径を同じ一つのネットワークとして取り扱うことの出来るモデルである。

たとえば、図-1 に示す異なる細孔径を表す2つのステ

ージを考える。各ステージにおける格子の大きさの関係は  $a_1 = a_2 \times 2$ 、であり、対応する細孔径は  $d_1 = d_2 \times 2$ 、となっている。

今、空隙が存在する確率が  $p_1$  のステージ1と空隙が存在する確率が  $p_2$  のステージ2の重ねあわせを考える。格子の大きさが異なるステージ1とステージ2を重ねあわせるため、ステージ2をステージ2'へ変形する(リノーマライズという)。この際、スケーリング則によりステージ2の空隙の存在確率  $p_2$  は、式(1)、図-2で示される空隙の存在確率を保持する関数  $f(p_2)$  で表わされる。

この変換されたステージ2' ( $\pi_2 = f(p_2)$ ) とステージ1

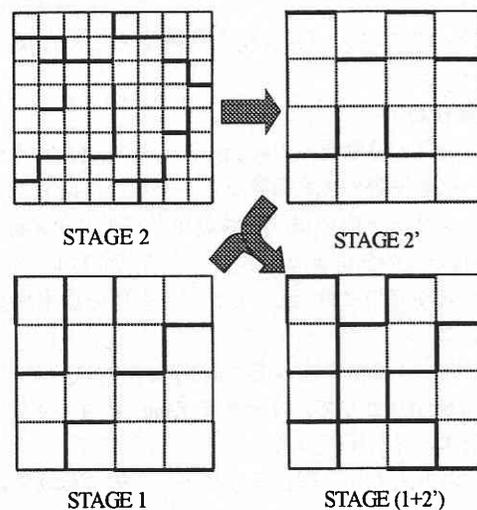


図1 マルチネットワークモデル

$$\begin{aligned}
 fN(p) &= 2^{2/N} p(1+8p) \\
 f(p) &= p^2(1+8p) & p \rightarrow 0 \\
 f(p) &= 1 - (1-p)^4 & p \rightarrow 1 \\
 f(p=pc) &= pc & p=pc \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

\*東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

( $p_1$ ) を重ねあわせると、ステージ ( $2+1$ ) の空隙の存在確率 ( $\pi_1$ ) は、 $\pi_1 = p_1 + (1 - p_1) f(\pi_2)$  となる。これを繰り返すことにより、異なるステージを一つのステージで表現することが可能となる。

2.2 水銀ポロシメータへの適用

J. F. Daian らは上記の MSNM を用いて、非ぬれ性流体とぬれ性流体への適応を試みている。以下に、非ぬれ性流体として水銀を取り上げた水銀ポロシメータの場合を考察する。

図-3で、水銀圧入試験の場合を考える。まず、はじめに大きな細孔を持つステージ A の細孔から水銀が浸入することになるが、この段階で水銀はステージ A の内部にある細孔には達していない。しかし、ステージ B の細孔に圧入する段階になると水銀は、ステージ B の細孔によってつながったステージ A の内部空隙にまで浸入する。

ここで、水銀ポロシメータの原理からいくと、外部から高圧をかけることでより小さな細孔へ水銀を浸入させているため、内部に大きい空隙が存在したとしても、そこへ浸入した水銀は、小さな細孔がその空隙と同じ容積分だけ存在したとしかカウントされないといったインクボトル効果が生じてしまうことになる。

そこで、この各ステージで浸入する水銀量  $v_i^k$  を先ほどの空隙存在確率と同様に考え、細孔容積を保持するように各ステージでの細孔容量を考えると、式 (2) で表すことが出来ることになる。ここで  $g(p)$  は、図-2 に示すリノーマライズの際に細孔容積を保持するための関数である。

2.3 物質移動

一般に物質の移動現象の評価方法として扱われる移動係数には、拡散係数や透水係数などがある。本研究においては、コンクリート中の細孔と移動係数の間に Poiseuille's の法則と Darcy's の法則より求められる透気係数  $k$  と細孔径  $r$  の関係が成り立つと仮定し、式 (3) を使い透水係数の決定を行った。

また、図-4 に示す透水係数  $a, b, c, d$  を式 (4) に示す関数  $f(a, b, c, d)$  として、まとめる King, P. R. の方法<sup>2)</sup> により、全体の透水係数を求めた。

これらの方法より、細孔径分布から全体の移動係数を求めることが可能となる。

3. 実験値との整合性

これらの解析を検証するため同一配合 (表-1) で AE 剤により空気量を調整したコンクリート供試体を作成し、水銀ポロシメータによる細孔径分布の測定と酸素拡散試験を行った。

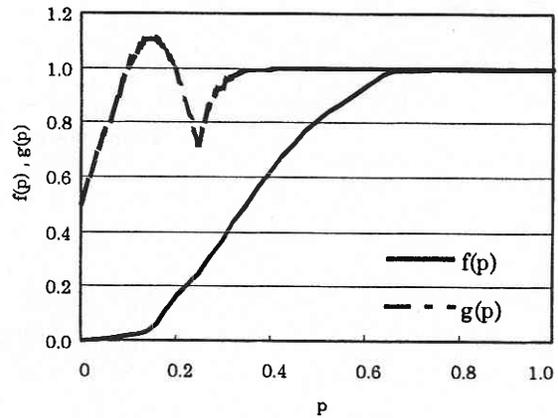


図2 関数  $f(p), g(p)$

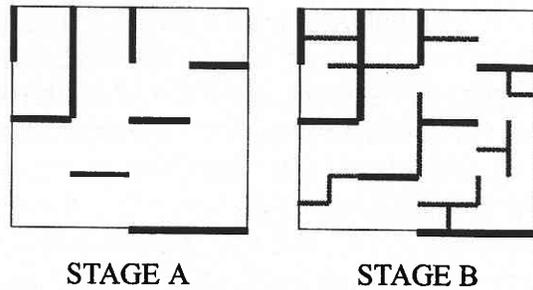


図3 水銀の侵入過程

$$v_{i=1}^k = u_1 \frac{y(\pi_1^k)}{\pi_1^k}$$

$$v_{i=2,k}^k = u_i g(\pi_1^k) g(\pi_{i-1}^k) \dots g(\pi_2^k) \frac{y(\pi_1^k)}{\pi_1^k} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

$$\pi_i^k = p_i + (1 - p_i) f(\pi_{i+1}^k)$$

$$u_i = p_i (1 - p_{i-1}) \dots (1 - p_1)$$

$$Y(p) \approx (p - p_c)^\beta \quad p = p_c$$

$$Y(p) = p [1 - (1 - p)^{10}] \quad p \rightarrow 1$$

$$Y_{N=64}(p) = \frac{1}{N} p (1 + 10p) \quad p \rightarrow 0$$

$$g(p) = \frac{f(p)}{p} \frac{Y(p)}{Y(f(p))}$$

$$p_c = 0.25$$

$$\text{Poiseuille's law } Q = \frac{\pi r^4 h}{8 \eta l}$$

$$\text{Darcy's law } Q = kA \frac{h}{l}$$

$$k = \frac{r^2}{8 \eta} \dots \dots \dots (3)$$

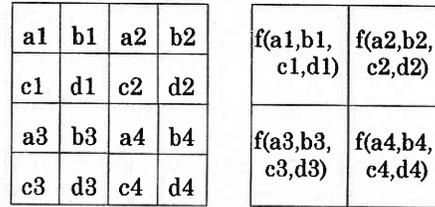


図 4 King's Model

ここで,  $k$ : 透水係数  $r$ : 細孔半径  $\eta$ : 粘性係数

3.1 細孔径分布

図一五にフレッシュ時の空気量が, 1.0%と12.2%の供試体について, 水銀ポロシメータのデータとそのデータを基に2.2で示したMSNMを適用した結果を示した.

いずれのケースにおいてもMSNMの処理を行う前のデータは, 1.0%のデータで0.1  $\mu\text{m}$ 以下で, 12.2%のデータでは1  $\mu\text{m}$ 以下で累積細孔量が上昇しているが, MSNMの処理を行ったデータでは, 初期の400  $\mu\text{m}$ 付近から累積細孔量が上昇し, MSNM処理を行わないデータが上昇し始める頃にはすでに横ばいとなっていることがわかる. このことは, MSNMの考え方を水銀ポロシメータに適用した場合, ポロシメータの初期の圧力に対応する細孔が大量にあることを示している. これは, 水銀ポロシメータの問題として指摘されているインクボトル効果を示しているものと考えることが出来る.

3.2 酸素拡散試験

本研究で行った酸素拡散試験<sup>3)</sup>の概要を図一六に示す. この酸素拡散試験は, コンクリート供試体を挟み込んだセルにそれぞれ1気圧で窒素と酸素を流入させ, 濃度差によってコンクリート中を透過してきた窒素中の酸素を酸素微量計により測定し, 式(5)より定常状態における酸素の透気係数を算出する試験である. なお, 本実験はコンクリート中の空隙構造の影響を明確にするため, 真空脱気を行い湿度の影響を受けない状態で実施した.

図一七に空隙量と透気係数の関係を示す. これらより, 既往の研究<sup>3, 4)</sup>でも報告されているように積算空隙容量が上昇するに連れて, 透気係数も上昇する様子が伺える. また, 本研究におけるモデルで算出した透気係数も, 積算空隙容量が上昇するに連れて, 透気係数も上昇するといった傾向を示している. しかし, 積算空隙率が11.9%の供試体では実験値と解析値が近い値を示しているものの, 積算空隙率が15.1%, 16.2%の供試体においては, 実験値と解析値の隔たりが大きくなっている. つまり, 空隙量の増加に伴う透気係数の増加が実験値に比べ, 解析値の方が小さくなってしまった.

$$f(a, b, c, d) = 4(a+c)(b+d) [bd(a+c) + ac(b+d)] \times \left\{ [bd(a+c) + ac(b+d)] [a+b+c+d] + 3(a+b)(c+d)(a+c)(b+d) \right\}^{-1} \dots \dots (4)$$

表1 配合表

W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
	水	セメント	細骨材	骨材:大/小
60	172	287	816	412/618

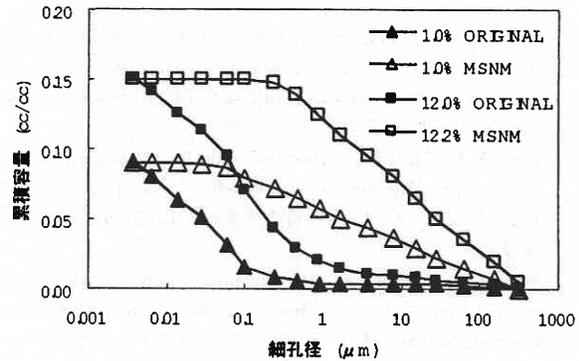


図 5 MSNMの水銀ポロシメータに与える影響

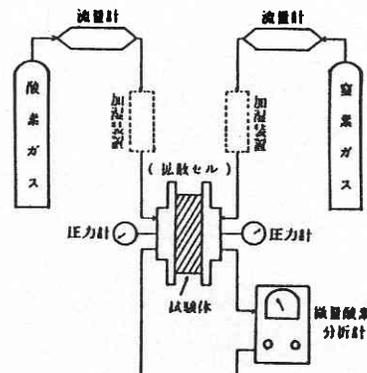


図 6 酸素拡散試験

研 究 速 報

今後、この差を修正するためにモデルの修正ならびに3次元への拡張が必要と思われる。

4. ま と め

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 本研究において、空隙を総空隙量ではなく細孔径分布として扱うことの出来るパーコレーション法を導入した結果、水銀ポロシメータにおける問題として指摘されているインポトル効果の影響を表現することが可能となった。
- (2) 検証には至らなかったが、スケーリング則を利用することで数 nm から数十  $\mu$  m 空隙に分布する移動係数を一つの移動係数にまとめる手法を示した。
- (3) 今後、本手法を有効に用いるためには、実際の移動現象との相関を測ることが重要と考えられる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、ご協力頂きました魚本研究室の方々に感謝致します。

(1998年4月10日受理)

参 考 文 献

- 1) Dr Ke XU, in collaboration with Dr J. F. tiscala Structures to describe Porous Media, Part I:Theoretical Background and Invasion by Fluids, Transport in Porous Media, volume 26, n-1, January 1997, p.p. 51-73.
- 2) King, P. R., The ues of renormalization for calculating effective permeability, Transport in porous media, 4 (1), pp. 37-58, 1989
- 3) 出頭圭二, セメント系材料の酸素拡散に関する研究, 博士論文.
- 4) Nyame, B. K. and Illstn, J. M.: Relationships between permeability and pore structure of hardened cement past, Magazine of Concrete Research, Vol. 33, No. 116, pp. 139-146, 1980.

$$D_N = \frac{Q \cdot L}{S \cdot \Delta C} \dots \dots \dots (5)$$

$D_N$ : 酸素透気係数 ( $cm^2/s$ )  
 $Q$ : 試験体を通る酸素流量 ( $cm^3/s$ )  
 $L$ : 試験体の厚さ ( $cm$ )  
 $S$ : 試験体の測定部分の面積 ( $cm^2$ )  
 $\Delta C$ : 試験体両面の酸素濃度差 ( $cm^3/cm^3$ )

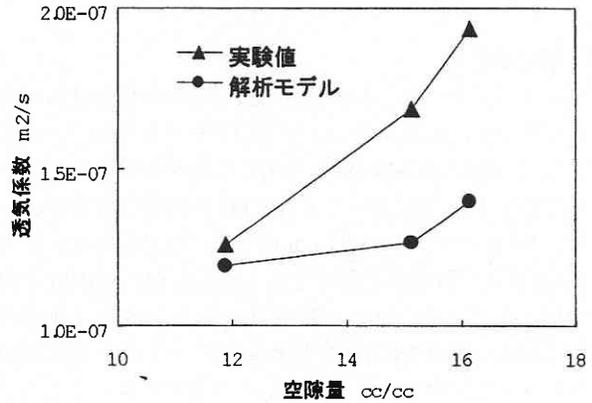


図7 透気係数の比較