

論文 格子ボルツマン法によるポーラスコンクリートの透水シミュレーションの検討

出雲 健司^{*1}

要旨：筆者はこれまでポーラスコンクリートの充填シミュレーションに関する研究を行ってきた。それらの研究によりポーラスコンクリートの空隙特性の検討が可能となったが、研究をさらに進めるために、格子ボルツマン法を適用したポーラスコンクリートの透水シミュレーションの研究を行った。本研究では2次元の格子ボルツマン法を使用し、その適用性と有効性を検討した。その結果、透水係数の算定では精度の面で次元の違いによる問題点が残るものの、空隙率が上がるほど透水係数が上がる傾向は表現できたことやポーラスコンクリート内の水の流れが可視化されるなどにより有効性を見出せた。

キーワード：ポーラスコンクリート，透水シミュレーション，2次元格子ボルツマン法

1. はじめに

ポーラスコンクリートは生態系保全をも含めた高機能環境負荷低減型材料として、その研究は近年益々盛んになっており、実施工においても様々な形態での適用が進められている。さらに、ポーラスコンクリートはその空隙特性により、吸音性状や調湿性状などを発揮することができ、様々な用途へと拡大している。

近年、環境保全や自然に優しいということが社会的な大きなテーマになっており、社会的なニーズとしても高いと言える。また、自然環境と共生がはかれるポーラスコンクリートは、自然破壊の象徴としてとらえられることの多いコンクリートのイメージアップにもつながる。

しかし、ポーラスコンクリートは多孔質性ゆえに空隙構造がその性能に大きく影響することがよく知られており、その空隙特性を明らかにする必要がある。筆者はこれまでポーラスコンクリートに粒子要素法を基にした充填シミュレーションを適用することで、ポーラスコンクリート内の空隙特性の検討を行ってきた^{1),2),3)}。その結果、骨材・空隙の配置が座標で明確化されることにより、空隙特性の検討が可能となった。そこで、さらに研究を進めるために、ポーラスコンクリートに、格子ボルツマン法を基に

した透水シミュレーションを適用することにより、ポーラスコンクリート内の水の流れや透水係数の算定を行うことを最終目的とする。本研究では、その前段階として2次元格子ボルツマン法をポーラスコンクリートに適用し、その適用性や有効性を検討した。

コンクリートへのシミュレーションとして、格子ボルツマン法が使われた例としては、嶋ら⁴⁾がコンクリート中の物質移動に適用した例以外あまり多くはなく、同じ系統のシミュレーションでもA.S.SUDJONOら⁵⁾のセルオートマトンを水和モデルに用いた例がある程度で、現在のところ、適用例はそれほど多くはない。

また、既報の研究³⁾でも触れているが、近年の計算機の発達により、実験、理論に次ぐ第三の研究手法として、コンピュータシミュレーションが注目されている。本研究は新たな研究手法であるコンピュータシミュレーションを使って実験量などを減らして効率的に研究を行おうとしている点が大きな特徴である。本研究はこれまで行ってきた既報の研究^{1),2),3)}の一環である。

2. シミュレーション概要

2.1 使用材料

充填・透水シミュレーションに使用するポー

*1 北海道大学大学院 工学研究科 助手 博士(工学) 正会員

ラスコンクリートの配合は既往の研究⁶⁾の配合の一部を使用している。セメントは普通ポルトランドセメント（密度:3.15g/cm³），粗骨材（密度:2.67g/cm³）であり，本研究の解析では細骨材を使用した配合はシミュレーションしていない。また，この配合内では既往の研究⁷⁾に示されているように，セメントペーストのだれがないと考えられる。本研究で使用した配合の諸量を表 - 1 に示す。なお，p/aは単位セメントペーストと単位骨材量の容積比を表している。また，シミュレーションで使用した骨材の粒径分布を表 - 2 に示す。

2.2 透水シミュレーション方法

本研究のポーラスコンクリートの透水シミュレーションは2次元の格子ボルツマン法^{8,9)}を基にしている。格子ボルツマン法は，近年，流体力学などで多く使われているシミュレーション手法である。したがって，筆者はポーラスコンクリートの透水シミュレーションにも適用が可能と考えている。

格子ボルツマン法は文字通りシミュレーション対象とする空間を規則的な格子によって一様に離散化される。シミュレーション対象は粒子として計算されており，規則的に配置された格子間を移動する。粒子の移動の際，粒子の衝突・並進・境界条件などの計算を行うことにより，粒子の分布より流速などの巨視的な変数の

算定を行う。格子ボルツマン法は，直接的に流体の支配方程式を解くシミュレーション法とは異なり，粒子の運動によってシミュレーションされるために，ポーラスコンクリートのような多孔質で複雑な形状を持った材料でも解析できるという利点がある。しかしながら，その反面，計算量が膨大になるという欠点も存在する。

本研究では2次元の格子ボルツマン法を使用しているが，3次元より2次元の方が圧倒的に計算量を抑えることができ，計算量が膨大になる欠点を少しでも補うことができる。したがって，本研究では2次元のシミュレーションがどこまで適用できるかも同時に検討している。

本研究では図 - 1 に示す正六角形格子をシミュレーション対象の空間に配置することとした。また，図 - 2 に示すとおり，粒子分布は2D7V(1-speed)モデル^{8,9)}を使用した。粒子分布は，1タイムステップ間で格子間を移動する1-speedモデルを使用し，静止を含めた粒子速度の空間次元を7種類とし，静止粒子を0として，反時計回りに1～6までの番号を付けた。

ポーラスコンクリート内を流れる水を非圧縮性流体として考えることとし，温度の変化をほとんど無視できると考えると，非熱流体モデルと考えることができ，McNamaraらのモデルが適用できると考えられる。

表 - 1 解析に使用した配合の諸量

	W/C	Gmax	s/a	p/a	空隙率(%)
配合 1	0.35	10mm	0	0.35	24.3
配合 2	0.40			0.28	29.4
配合 3	0.45			0.24	30.0

表 - 2 シミュレーションで使用した骨材の粒径分布

粒径(mm)	10	5
%	68.3	31.7

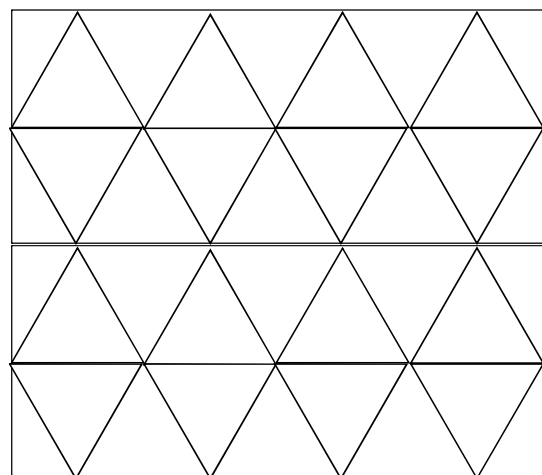


図 - 1 正六角形格子

本研究のシミュレーション手順を図 - 3 に示す。その内容を以下に簡単に説明をする。まずは、充填シミュレーションにより骨材や空隙の配置を決定し、格子の設定などの初期条件を設定する。

図 - 2 に示すように、各格子点において6つの速度方向に進む各運動粒子と格子点上に静止

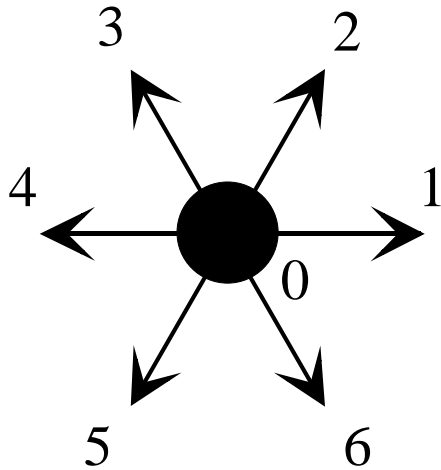


図 - 2 2 D 7 V (1-speed) モデル

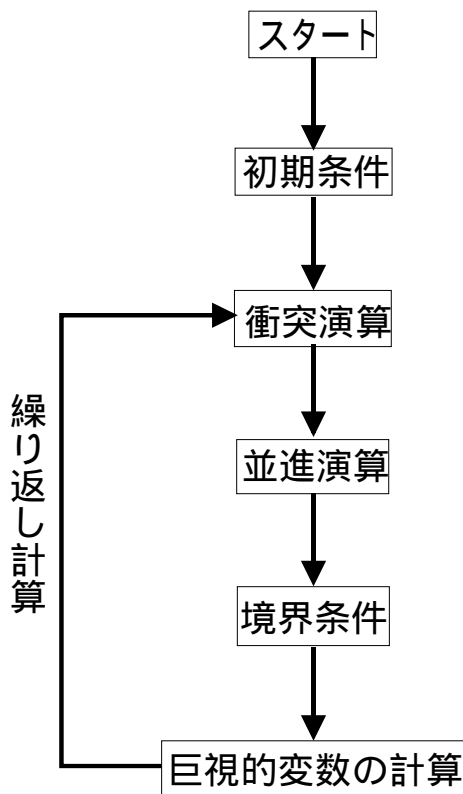


図 - 3 本研究のシミュレーション手順

する静止粒子が存在し、これらの粒子の存在は速度分布関数 $f_i(i=0,1,2,\dots,6)$ によって表すものとする。この時の各格子点における流体の密度 ρ および単位体積当たりの運動量は以下の式で表される。

$$\rho = \sum_{i=0}^6 f_i \quad (1)$$

$$\rho \vec{u} = \sum_{i=0}^6 f_i \vec{c}_i \quad (2)$$

ここで、 \vec{c}_i : i 方向へ移動する運動粒子の速度ベクトル

\vec{u} : 格子点における流速ベクトル

次に、粒子の衝突を以下の式で演算を行う。

$$f'_i(t, \vec{r}) = f_i(t, \vec{r}) + \Delta_i(t, \vec{r}) \quad (3)$$

ここで、 $f'_i(i=0,1,2,\dots,6)$: 衝突後の速度分布関数

$f_i(i=0,1,2,\dots,6)$: 衝突前の速度分布関数

t : 時刻

\vec{r} : 格子点

また、衝突の際、以下の式が満足されることとする。

$$\sum_{i=0}^6 \Delta_i = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^6 \Delta_i \vec{c}_i = 0 \quad (5)$$

各粒子の衝突後は、1 タイムステップ τ 進めることにより、並進を演算する。並進後の格子点における速度分布関数は以下ようになる。

$$f_i(t+\tau, \vec{r} + \vec{c}_i \tau) = f_i(t, \vec{r}) \quad (6)$$

次に、固定壁や流入・流出の境界条件を計算する。ここでの設定法は、局所平衡分布関数が巨視的な流れの変数である流体の密度 ρ と流速 \vec{u} 、内部エネルギーによって定義されているこ

とを利用しており，McNamaraらの提案したモデルではMaxwell-Boltzmann分布に類似した以下の局所平衡分布関数を使用して計算している。

$$f_i^{(0)} = F_i \exp\{h(\rho, \vec{u}) + \vec{q}(\rho, \vec{u}) \cdot \vec{c}_i\} \quad (7)$$

ここで， F_i ：粒子の生み出す衝突断面積と消費する断面積の比

h, \vec{q} ：密度 ρ と流速 \vec{u} の関数

以上の計算より，各格子点の速度分布関数を計算し，式(1),(2)の関係などから巨視的な変数である密度や流速などを算定する。これらを決められたタイムステップ分の繰り返し計算を行い，シミュレーションは終了する。

2.3 本透水シミュレーションの対象

本透水シミュレーションの対象はJIS A 1218に準拠した定水位試験法によるポーラスコンクリートの透水係数測定試験とする。試験条件としては，既往の研究⁷⁾を参考にし，図 - 4 に示されているように，供試体の長さを200mm，水頭差を200mmに設定しており，供試体と供試体と同じ高さ分の型枠の部分のみをシミュレーション対象とした。

骨材と空隙の配置としては，既報の研究³⁾のシミュレーション手法により，骨材を球形と仮定し，その周りにセメントペーストが均等に付着しているとしたモデル化骨材を使ったポーラスコンクリートの充填シミュレーション結果によって得られた中央部分の断面図から作成することとした。中央の断面積を1mm×1mmの正方形セルに区分して，骨材と空隙，型枠の配置を決定し，その空間上に図 - 1 に示される格子の一边を0.333mmとして正六角形格子を配置した。

シミュレーションに使用した断面図を図 - 5 に示す。この図に示されているように，骨材表面は曲線で表されるものだが，正方形でセルを区切ったため，角張った骨材配置となっている。

なお，シミュレーションの開始時にはポーラ

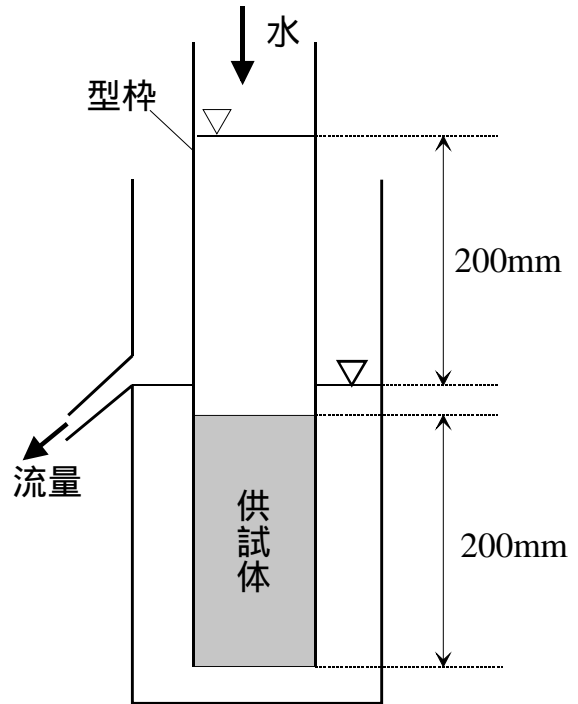


図 - 4 シミュレーションの対象図 (定水位試験法)

スコンクリート内に水が完全に飽和されている状態として，シミュレーションを行っており，骨材と型枠は固定壁として扱った。

シミュレーションを行う際，レイノルズ数は100とし，1ステップ当たりの時間は 1.0×10^{-4} 秒で，10000ステップの繰り返し計算を行った。

また，シミュレーションによる透水係数の算定法は供試体の下縁部分の流量が定常状態になった時点での流量を使用し，JIS A 1218に基づき，下記の式にて透水係数を算定した。

$$K = \frac{L}{h} \frac{Q}{A(t_2 - t_1)} \quad (8)$$

ここで， K ：透水係数(cm/s)

L ：供試体長(cm)

h ：水頭差(cm)

Q ：定常状態に達した流量(cm³)

A ：供試体断面積(cm²)

$t_2 - t_1$ ：測定時間(s)；本研究では1ステップ当たりの時間

3. シミュレーションの結果と考察

図 - 6 に格子ボルツマン法を適用したポーラ

スコングリート内の水の流れを示す。この図の赤の部分（白黒では黒の部分）がセメントペーストを含んでいるモデル化骨材で、黒い線が水の流速をベクトルで、線がない部分は水が滞留していることを示している。この図の上側が流入方向で、下側が流出方向である。この図に示

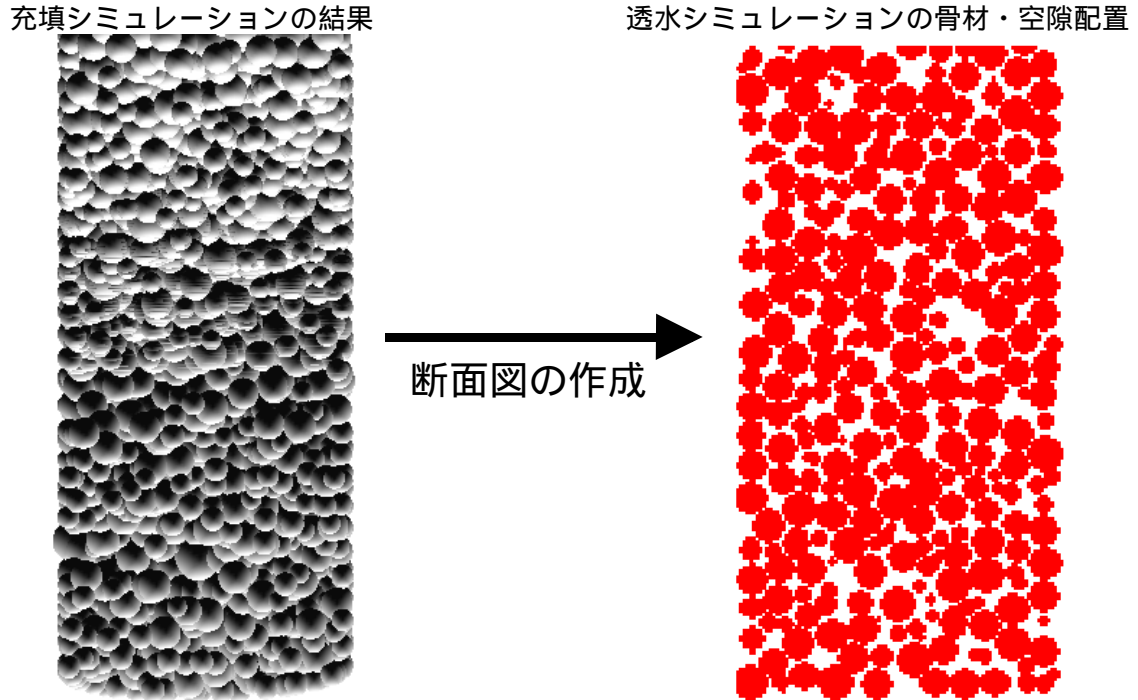


図 - 5 透水シミュレーションに使用する骨材・空隙配置図

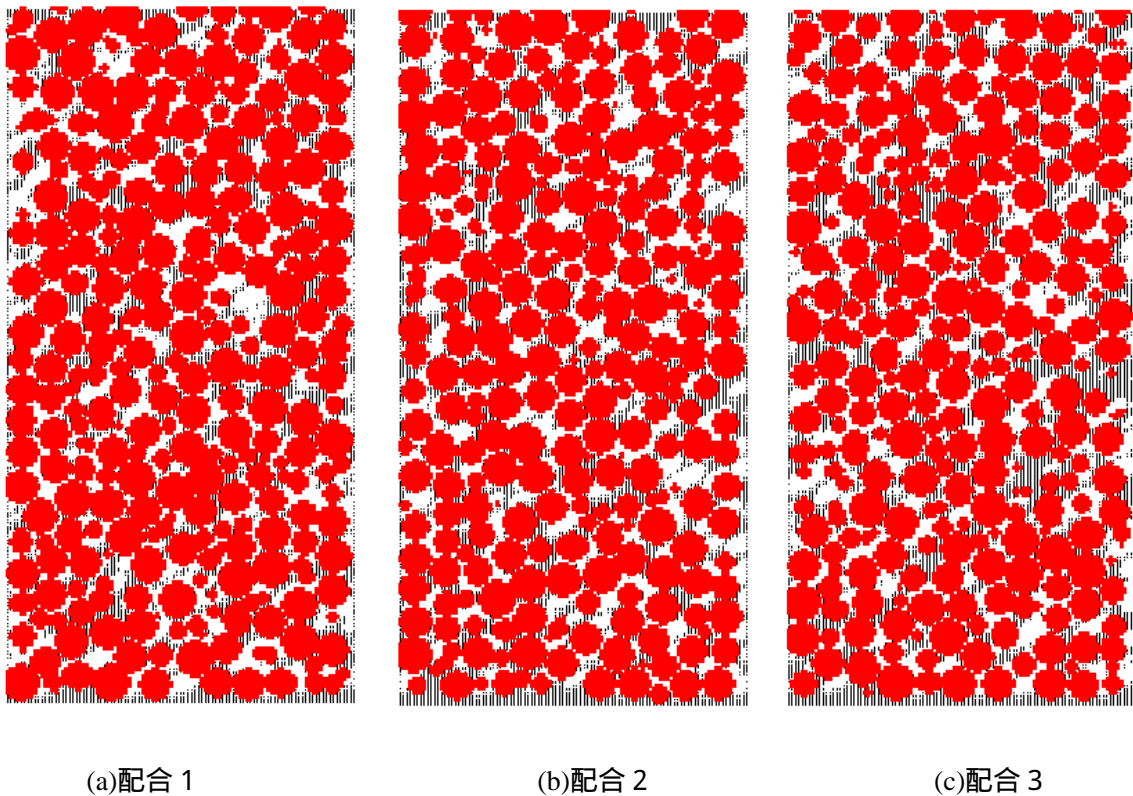


図 - 6 ポーラスコングリート内の水の流れ

されるように、水が流れる部分、水が流れずに滞留する部分が可視化できることから格子ボルツマン法の有効な点が認識できる。

図 - 7 にシミュレーションによる計算結果と実験値⁶⁾による透水係数の比較を示す。空隙率の低い順から配合 1, 2, 3 と並んでいる。この図に示されるように、計算結果では空隙率が上がるほど透水係数が増えるという傾向は出ているものの、実験値と比較した場合、精度よく実験値を再現できたとはいえない結果となった。シミュレーションの手法などを今後再検討する必要があるが、最も影響している原因としては次元の違いだと思われる。実際の現象は奥行き方向を含めた 3 次元的な挙動であり、2 次元的なシミュレーションでは再現が難しいと思われる。計算量がさらに膨大になるが、今後、シミュレーションを 3 次元化することを検討したいと考えている。

4. まとめ

本研究の内容はまだまだ萌芽的であり、検討する点が多く存在するが、本研究の範囲内で以下の知見が得られた。

本研究の 2 次元格子ボルツマン法によるポーラスコンクリートの透水シミュレーションによって得られた透水係数は実験値と比較して、精度そのものはあまりよくないが、空隙率が上がるほど透水係数が増えることが再現できたことやポーラスコンクリート内の水の流れが明確化されるなどの点では有効性は示唆された。

今後、シミュレーション手法を 3 次元化する予定である。

参考文献

- 1) 出雲健司：粒子要素法によるポーラスコンクリートの充填シミュレーションへの検討，コンクリート工学年次論文報告集第 2 4 巻第 1 号，pp.1167-1172, 2002
- 2) 出雲健司：3 次元粒子要素法によるポーラスコンクリートの充填シミュレーション，コンク

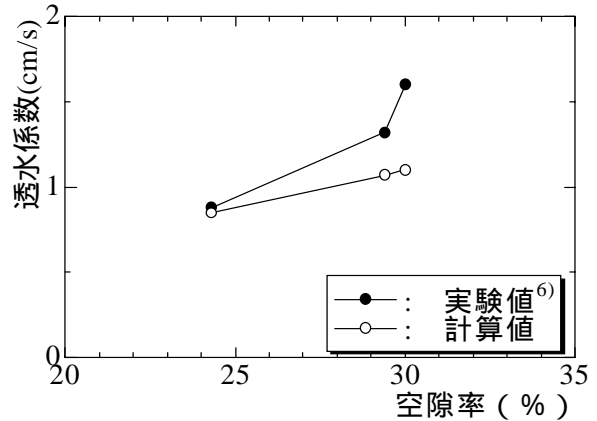


図 - 7 透水係数の実験値と計算値の比較

リート工学年次論文報告集第 2 5 巻第 1 号，pp. 1157-1162, 2003

- 3) 出雲健司：3 次元粒子要素法によるポーラスコンクリート内の連続空隙について，コンクリート工学年次論文報告集第 2 6 巻第 1 号，pp.1473-1478, 2004
- 4) 嶋毅，佐伯竜彦，長瀧重義：コンクリート中の物質移動に対する LBM の適用への基礎的検討，コンクリート工学年次論文報告集第 2 3 巻第 2 号，pp.817-822, 2001
- 5) A.S.SUDJONO，関博：セルオートマトン法を用いたポルトランドセメントの複合水和反応モデル，土木学会論文集，No.704/V-55，p.81-100, 2002
- 6) 中澤隆雄，Abderrazak ZOUAGHI，今井富士夫：ポーラスコンクリートの配合が透水性および強度に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.382-387, 1996
- 7) 徳重英信，佐伯昇，川上洵：振動締固め方式による透水性コンクリートの配合設計法に関する研究，土木学会論文集，No.627/V-44，p.1-11, 1999
- 8) 薦原道久，高田尚樹，片岡武：格子気体法・格子ボルツマン法 - 新しい数値流体の手法 - ，コロナ社，1999
- 9) 加藤恭義，光成友孝，築山洋：セルオートマトン法 - 複雑系の自己組織化と超並列計算処理 - ，森北出版株式会社，1998