

論文 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の検討

出雲 健司^{*1}

要旨：本研究はポーラスコンクリートに対して充填シミュレーションという概念を新たに導入し、シミュレーションの適用性とポーラスコンクリートの骨材の配置状況と空隙分布を検討している。解析手法としては粉体工学で充填シミュレーションにおいてよく使われている粒子要素法を使用している。粒子要素法は粒子、本研究では骨材であるが、骨材一つを一つの要素として計算できるためにポーラスコンクリートを不連続体として扱えるのが特徴であり、解析の結果、本研究はまだまだ萌芽的な研究で検討すべき点が多いが、骨材配置や空隙分布が明確になるなど粒子要素法を使用する意義は大きいと思われる。

キーワード：ポーラスコンクリート，充填シミュレーション，粒子要素法，空隙分布

1. はじめに

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、コンクリートなどの建設材料に対してもそれらが求められている。そのような状況下、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のポーラスコンクリート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。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、その空隙構造を明らかにする必要がある。

そこで、充填シミュレーションという概念を新たにポーラスコンクリートに導入することを試みた。具体的には、粉体工学で用いられている粒子要素法をポーラスコンクリートの充填シミュレーションに適用して、その空隙構造、言い換えれば、骨材の配置のシミュレーションを行うことにより骨材の配置を予測し、ポーラスコンクリートの性質を左右する上で重要な空隙分布を定量的に評価することを最終目的と考えている。その研究の一環として、本研究では、シミュレーションの適用性とパラメータの影響を評価するものである。

高流動コンクリートなどの分野では粘性空間

要素法 (VDEM)²⁾ や離散要素法 (DEM)³⁾ などを使った流動解析が行われているが、ポーラスコンクリートの分野では本研究がほぼ初めての試みである。また、近年の計算機の発達によりコンピュータシミュレーションが、実験、理論に次ぐ第三の研究手法としての注目されている。先端材料の分野ではコンピュータシミュレーションで新素材の開発や研究を行うのは当たり前になっているが、コンクリートの材料分野ではシミュレーションがほとんどなされていないのが現状であり、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いる点が大きな特徴である。

2. シミュレーション概要

2.1 使用材料

充填シミュレーションに使用するポーラスコンクリートの配合は既往の研究⁴⁾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:3.16g/cm³)、粗骨材は沙流川産6号砕石 (密度:2.79g/cm³, 粒径:7mm ~ 13mm, F.M.:6.04, 吸水率:1.27%) 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、実験ではアミノスルホン酸系高性能 A E 減水剤を適量使用しており、セメ

*1 北海道大学大学院助手 工学研究科 博士(工学) 正会員

ントペーストのだれがないことを確認している。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。

表 - 1 解析に使用した配合の諸量

| W/C | Gmax | s/a | p/a |
|------|------|-----|------|
| 0.25 | 13mm | 0 | 0.25 |
| | | | 0.28 |
| | | | 0.30 |

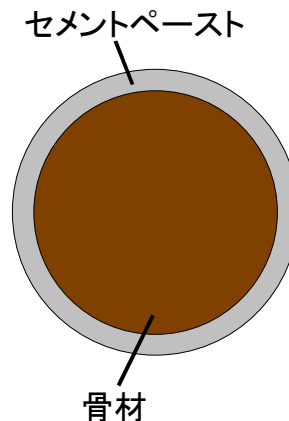


図 - 1 モデル化骨材の概念図

2.2 シミュレーション方法

粒子要素法は粉体工学で使われている解析手法で文字通り粒子一つ一つを要素として扱うために、不連続体を扱うことが出来る。本研究では粒子に当たるのが骨材一つ一つであり、シミュレーションをするのに当たって、モデル化を簡素化するために、以下の仮定条件を設けた。

- 1) 骨材は完全な球形である。
- 2) セメントペーストは骨材の周りに膜状にしかも均等に付着しており、ペーストのだれがない。(図 - 1)
- 3) セメントペースト部分は充填シミュレーション中には変形はしない。

これらの仮定条件の下、粉体工学で使用されている2次元2成分系粒子要素法のプログラム⁵⁾を骨材の粒径分布を考慮できるプログラムに拡張してシミュレーションを行った。使用した骨材の粒径分布を表 - 2 に、シミュレーションに使用したパラメーターを表 - 3 に示す。なお、摩擦係数の決定はモデル化骨材 - 型枠間の摩擦

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) | 13 | 10 | 7 |
|--------|----|----|----|
| 割合(%) | 4 | 48 | 48 |

係数は既往の研究⁶⁾を参考にし、モデル化骨材同士の摩擦係数に関しては既往の研究³⁾を参考にし、3種類を設定している。ただし、摩擦係数を測定することは大変に難しくこのモデルを完成させる上で今後の課題である。

基本モデルは図 - 2 に示すように、粒子間の相互作用力を接触した2粒子の法線方向とそれに垂直なせん断方向に分けて考え、図 - 3 に示す弾性挙動と粘性挙動を表現できるフォークトモデルを使用した。この時、せん断方向には粒子間の摩擦を考慮するために摩擦スライダを設けている。

2粒子間に働く力 F による並進変位を u 、回転変位を ψ とすると、式(1)、(2)が成り立つ。

表 - 3 シミュレーションに使用したパラメーター

| 骨材のヤング係数(N/mm ²) | 型枠のヤング係数(N/mm ²) | モデル化骨材のポアソン比 | 型枠のポアソン比 | モデル化骨材同士の摩擦係数 | モデル化骨材 - 型枠間の摩擦係数 |
|------------------------------|------------------------------|--------------|----------|--------------------|-------------------|
| 60000 | 210000 | 0.25 | 0.3 | 0.3 0.1 0.01 | 0.1 |

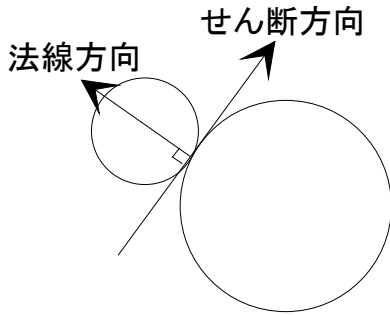
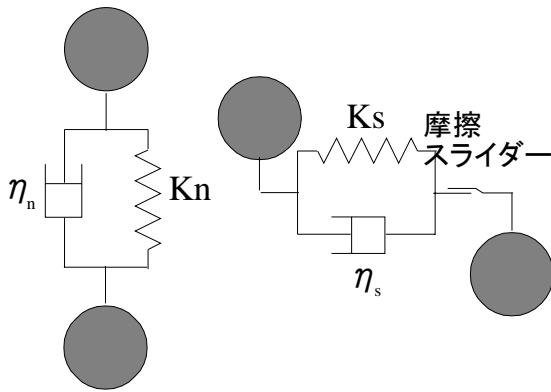


図 - 2 モデル化骨材間の作用力の方向



(a)法線方向 (b)せん断方向

図 - 3 モデル化骨材間相互作用力のモデル

$$m \frac{du^2}{dt^2} + \eta \frac{du}{dt} + Ku = 0 \quad (1)$$

$$I \frac{d\psi^2}{dt^2} + \eta r^2 \frac{d\psi}{dt} + Kr^2 \psi = 0 \quad (2)$$

ここで, m : モデル化骨材の質量

η : ダッシュポットの粘性係数

K : バネの弾性係数

I : 慣性モーメント

$$I = \rho_p \pi r^4 / 2$$

ρ_p : モデル化骨材の密度

r : モデル化骨材の半径

ただし, 実際の計算では, 個々の接触点に対して上式を解くのは不可能なので, 時間増分で差分近似して計算している。また, クーロン摩擦法則から得られたせん断力より大きな力は作用しないので式(3), (4)の条件を設けている。

$$e_n \leq 0 \text{ の時, } e_s = 0 \quad (3)$$

$$e_s \geq \mu e_n \text{ の時, } e_s = \mu e_n \quad (4)$$

ここで, e_n : 法線方向の弾性力

e_s : せん断方向の弾性力

μ : モデル化骨材同士の摩擦係数

本研究のシミュレーションでは充填の際, ポーラスコンクリートの骨材が自由落下して, 型枠に充填していくことを想定している。また, 解析対象は 100 × 200mm の円柱供試体を想定し, 骨材投入開始後 2 秒もしくは平衡に達するまでシミュレーションを行っている。

3. シミュレーションの結果と考察

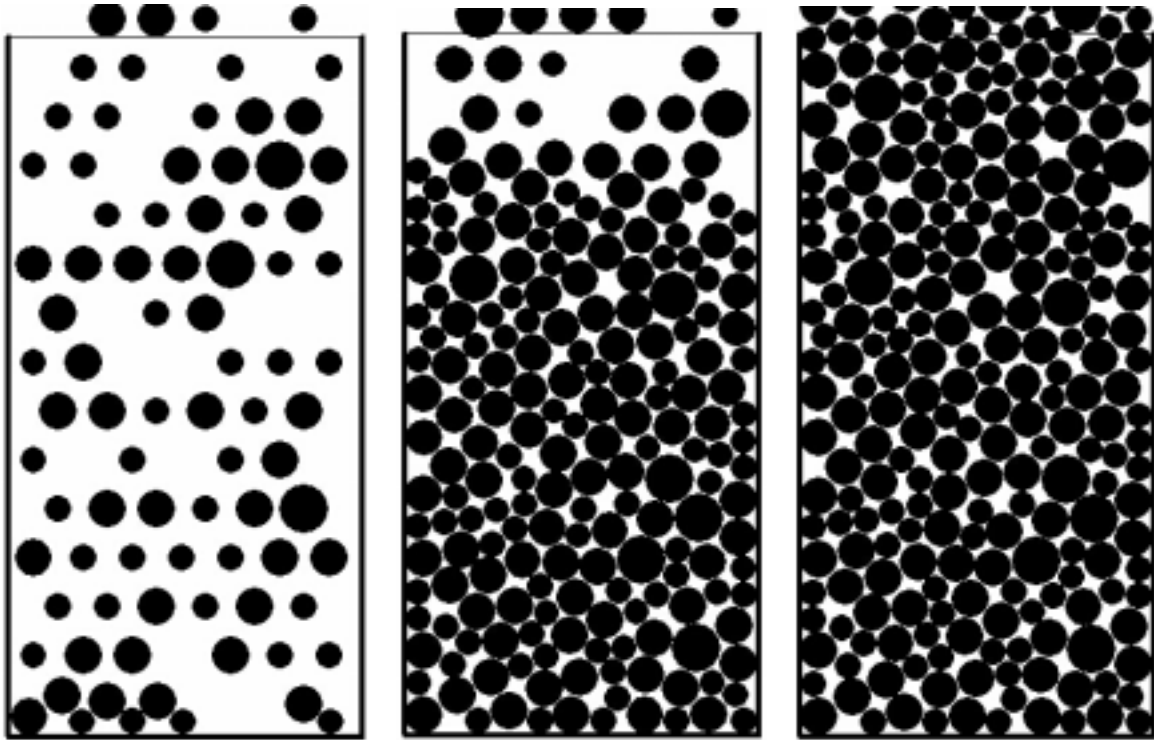
3.1 充填過程

図 - 4 に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の過程を示す。この図は $p/a=0.25$, 摩擦係数 0.1 の条件下でシミュレーションしている。この図に示されるように (a) から (c) に時系列的にセメントペーストで覆われた骨材が充填していく様子がわかる。特に, モデル化骨材一つ一つが要素なので, ポーラスコンクリートの特徴である骨材の配置, 並びに空隙の分布と構造が明確にされる点で粒子要素法は優れていると言える。

3.2 セメントペースト容積比の影響

セメントペースト容積比の割合を変化させることにより, 骨材の周りに付着するセメントペーストの膜の厚さが変化する。これが, 充填シミュレーション結果にどう影響するかをここでは考察する。なお, モデル化骨材同士の摩擦係数は 0.1 と固定してシミュレーションを行っている。その結果を図 - 4 (c) と図 - 5 に示す。シミュレーション結果の実積率でいうと, $p/a=0.25, 0.28, 0.30$ の順で, 79.2%, 78.9%, 78.3% と徐々に下がる傾向が見受けられるが, ほとんど実積率には影響はしないと思われる。ただし, これらの図を見比べると, 空隙の位置や大きさが異なるのが見受けられる。

図 - 6 に, 各セメントペースト容積比の空隙

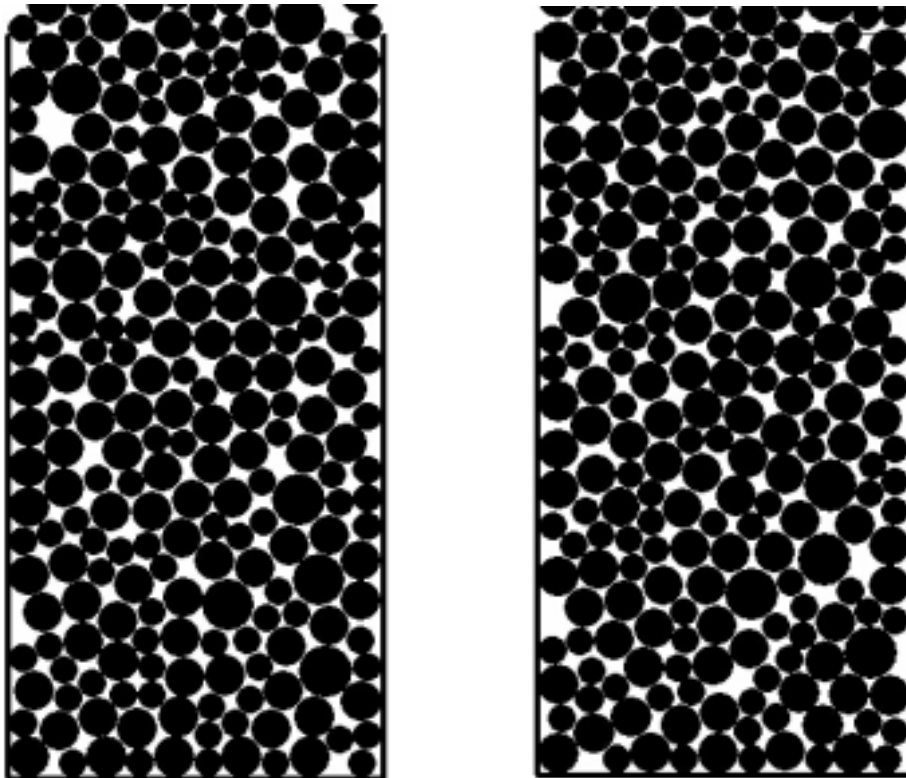


(a)Step-1
(0.05min)

(b)Step-5
(0.25min)

(c)Step-28
(1.4min)

図 - 4 ポーラスコンクリートの充填過程



(a) $p/a=0.28$

(b) $p/a=0.30$

図 - 5 異なるセメントペースト容積比での充填状況

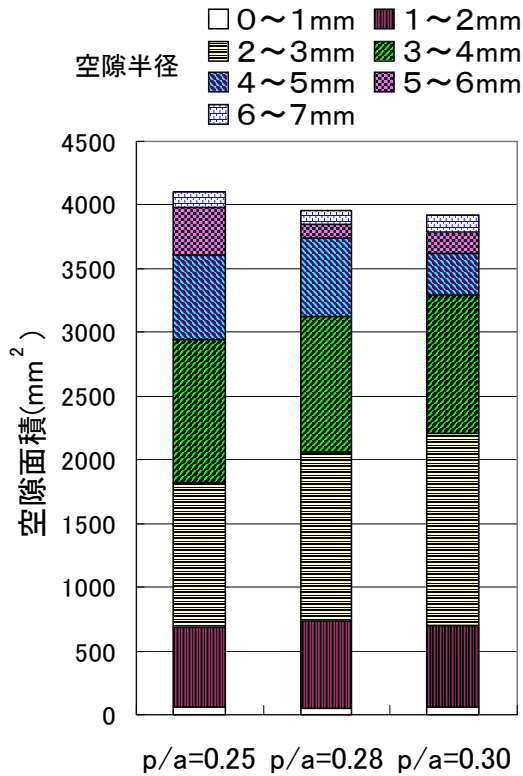
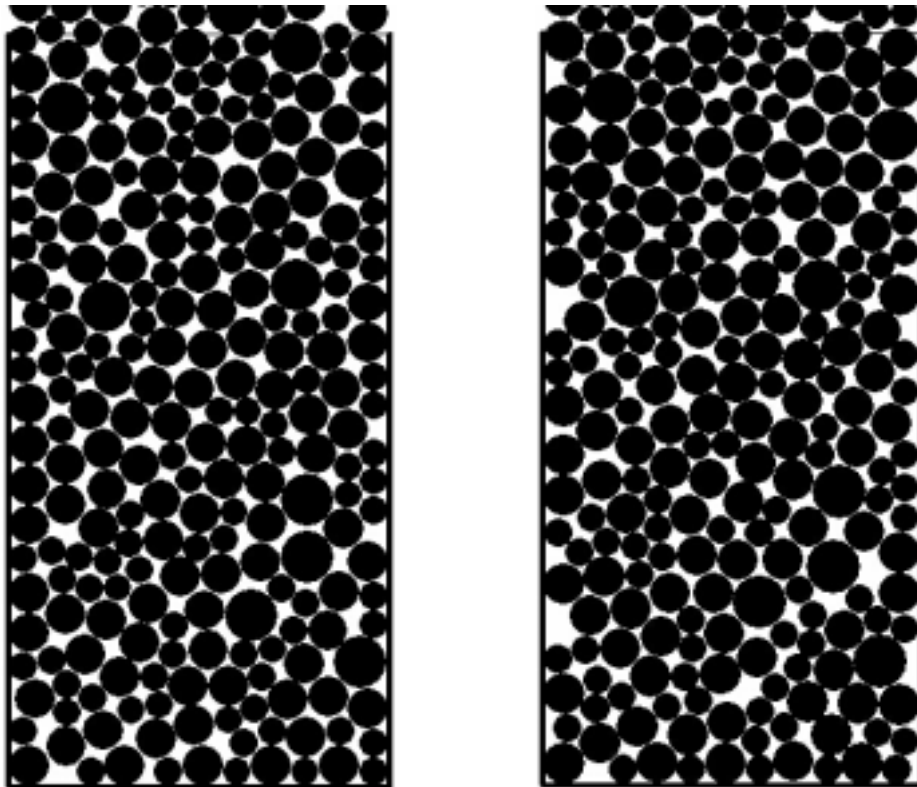


図 - 6 各セメントペースト容積比の空隙半径の分布

面積とその空隙半径の分布を示す。ただし、解析が2次元なので、縦軸を空隙面積としている。この図に示されるように、 p/a が大きくなるにつれて、空隙半径2～3mmの量が大きくなっている。

3.3 モデル化骨材同士の摩擦係数の影響

使用するセメントペーストのフロー値により、モデル化骨材同士の摩擦係数が変化することが考えられるが、既往の研究でセメントペーストのフロー値より摩擦係数を求めた研究がなく、本研究でも検討していないので、ここでは直接モデル化骨材同士の摩擦係数を変化させることによりその影響を検討した。なお、セメントペースト容積比 $p/a=0.25$ 一定でシミュレーションを行っている。その結果を図 - 4 (c)と図 - 7 に示す。シミュレーション結果の実積率でいうと、摩擦係数0.01, 0.1, 0.3の順で、79.5%, 79.2%, 79.3%となっておりほとんど変化が見られない。ただし、セメントペースト容積比の影響と



(a)摩擦係数0.01

(b)摩擦係数0.3

図 - 7 異なるモデル化骨材同士の摩擦係数での充填状況

同様に、空隙の位置や大きさが異なるのが見受けられる。

図 - 8 に、各モデル化骨材同士の摩擦係数の空隙面積とその空隙半径の分布を示す。この図に示されるように、摩擦係数が大きくなるにつれて、空隙半径 4 ~ 5 mm の量が大きく、それ以下の空隙半径の量が小さくなっている。

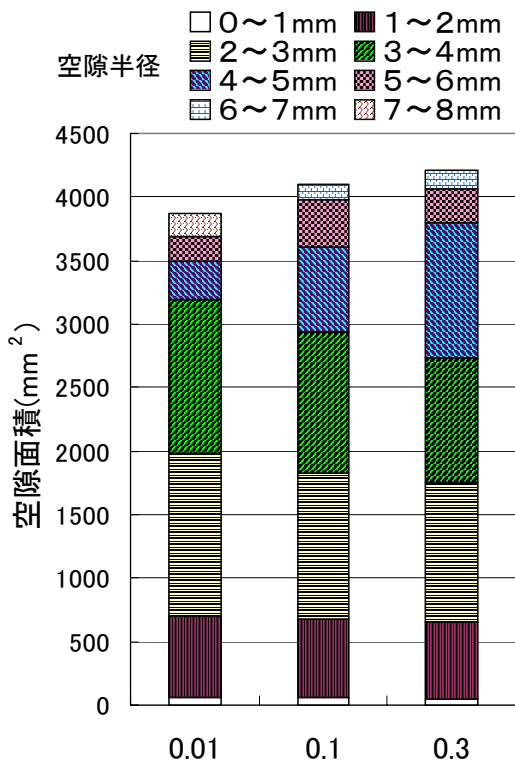


図 - 8 各摩擦係数の空隙半径の分布

4. まとめ

本研究は萌芽的であり、今後、モデル化骨材同士の摩擦係数、モデル化骨材 - 型枠間の摩擦係数などパラメーターで考慮すべき点や計算方法などの解析テクニックで考慮すべき点が多いと思われるが、本研究の範囲内で以下の知見が得られた。

1) 骨材の配置や空隙分布が明確になるなどの点からポーラスコンクリートの充填シミュレーションに対して粒子要素法を適用するのは有益であると考えられる。

2) セメントペースト容積比が大きくなるほ

ど、実積率にはそれほど大きな影響を及ぼさないが、空隙半径 2 ~ 3 mm の量が大きくなっている。

3) モデル化骨材同士の摩擦係数が大きくなるほど、実積率にはそれほど大きな影響を及ぼさないが、空隙半径 4 ~ 5 mm の量が大きく、それ以下の空隙半径の量が小さくなっている。

謝辞

本研究に際し、ポーラスコンクリートの情報を下さった秋田大学の徳重英信先生に深謝します。

参考文献

- 1) 出雲健司：ポーラスコンクリートの充填シミュレーションへの粒子要素法の適用性について、土木学会北海道支部年次大会論文報告集，第 58 号，pp.886-887，2002
- 2) 森博剛，谷川恭雄，黒川善幸，岡崎浩徳：粘塑性空間要素法を用いた高流動コンクリートのコンシステンシー試験の流動シミュレーション，コンクリート工学年次講演論文集，第 22 巻，第 2 号，pp.391-396，2000
- 3) 小林秀徳，平野優，白岩誠史，町田篤彦：個別要素法による高流動コンクリートの流動解析用パラメータに関する研究，コンクリート工学年次講演論文集，第 21 巻，第 2 号，pp.505-510，1999
- 4) 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
- 5) 粉体工学会：粉体シミュレーション入門，産業図書，1999
- 6) 谷川恭雄，森博嗣，筒井一仁，黒川善幸：スランプ試験およびすべり抵抗試験によるフレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定，コンクリート工学年次講演論文集，第 8 巻，pp.381-384，1986