

論文 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

出雲 健司^{*1}

要旨：筆者は既報の研究で、ポーラスコンクリートに対して粒子要素法を使用した2次元・3次元の充填シミュレーション手法についての研究を行ってきた。これらの研究では骨材周りに付着していたセメントペーストの変形を考慮していなかったが、本研究では、セメントペーストの変形を考慮したモデルに変更した上で、ポーラスコンクリート内の連続空隙を算定した。その結果、さらにシミュレーション量を増やして実験の再現性などの精度をもう少し向上させるなどの改良の余地があるものの、連続空隙の算定までの充填シミュレーションはほぼ完成できたといえる。

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，実積率，連続空隙

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。

また、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。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、筆者は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し、粉体工学でよく用いられている粒子要素法を使ってこれまで2次元・3次元でポーラスコンクリートの充填シミュレーションを行ってきた^{1),2)}。本研究はこれら既報の研究の2次元・3次元シミュレーションの手法を踏まえて、シミュレーションによる実験データとの再現性の検証と、充填シミュレーションにより得られた結果からポーラスコンクリートの連続空隙を算定し、その結果を検討したものである。

また、既報の研究²⁾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。

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³⁾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、この配合内では既報の研究⁴⁾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。

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3次元シミュレーションを行ったが、既報の研究^{1),2)}のシミュレーションと同じ仮定条件は以

*1 北海道大学大学院 工学研究科 助手 博士(工学) 正会員

下の1)と2)であり、3)は本研究で初めてを設けた条件である。

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。つまり、条件1)と2)を合わせると図-1のようなモデル化骨材となり、本研究で使った一つの要素となる。

3) セメントペースト部分は充填シミュレーション中に、図-2のように変形し、変形したペーストは外側に均等に動くこととし、骨材同士が接触した場合に作用力が働くと考えた。

これらの仮定条件の下、既報の研究^{1),2)}でのシミュレーションプログラムの基となった2次元・3次元粒子要素法のプログラムを既往の研究^{5),6)}を参考にして、仮定条件3)に変更してシミュレーションを行った。使った骨材の粒径分布を表-2に、シミュレーションに使っ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-型枠間の摩擦係数は既往の研究⁷⁾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⁸⁾を参考にし、1種類を設定した。

基本モデルも既報の研究^{1),2)}と同じく、図-3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-4に示す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。

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

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

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

表-1 解析に使った配合の諸量

	W/C	Gmax	s/a	p/a
配合1	0.35	10mm	0	0.35
配合2		15mm		

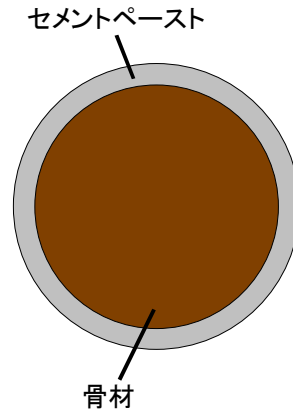


図-1 モデル化骨材の概念図

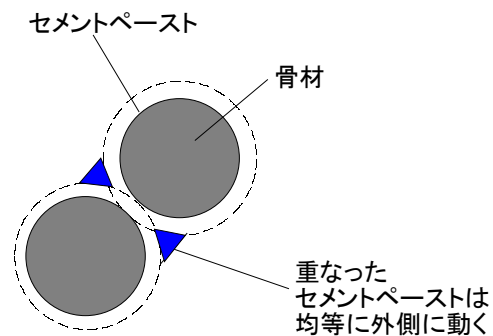


図-2 モデル化骨材におけるセメントペーストの変形概略図

表-2 シミュレーションに使った骨材の粒径分布

(単位:%)

粒径(mm)	15	10	5
配合1	-	68.3	31.7
配合2	39.2	60.8	-

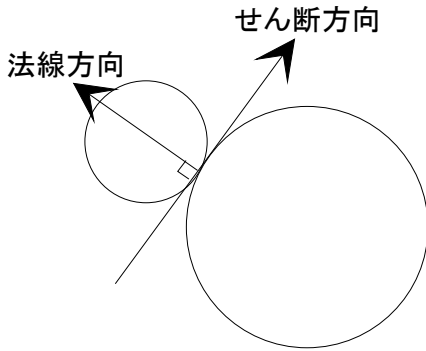
$$I = \rho_p \pi r^4 / 2$$

ρ_p ：モデル化骨材の密度

r ：モデル化骨材の半径

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	0.1	0.1



e_s : せん断方向の弾性力

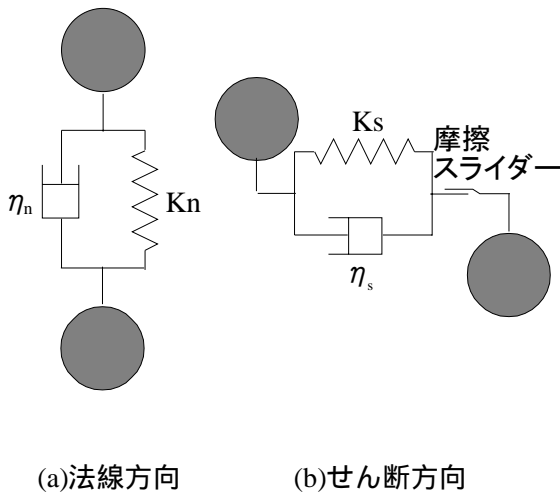
μ : モデル化骨材同士の摩擦係数

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た。また、シミュレーションに非常に多くの時間がかかるのでパーソナルコンピュータ四台での並列計算を行った。

2.3 連続空隙の算定法

ポーラスコンクリート内の空隙は充填シミュレーションした結果を一辺 0.4mm の立方体のセルで分割し、空隙が面で隣り合っている場合、空隙が連続しているものとした。また、連続空隙はその空隙がポーラスコンクリートの上面から下面まで連続である空隙とし、独立空隙はモデル化骨材や型枠などで閉塞されている空隙であるとして取り扱った。

図 - 3 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 - 4 モデル化骨材間相互作用力のモデル

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た。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)の条件を設けた。

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

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

ここで、 e_n : 法線方向の弾性力

3. シミュレーションの結果と考察

3.1 充填過程

図 - 5 に 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の過程を示す。これら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り、既報の研究²⁾とそれほど大きな違いはない。

表 - 4 に実験結果と本研究の 3 次元シミュレーションの実積率の比較を示す。配合 1 と 2 とも実験結果を完全に再現できたとは言い難いが、その差は 4 ~ 5% 以内でありそれほど大きく

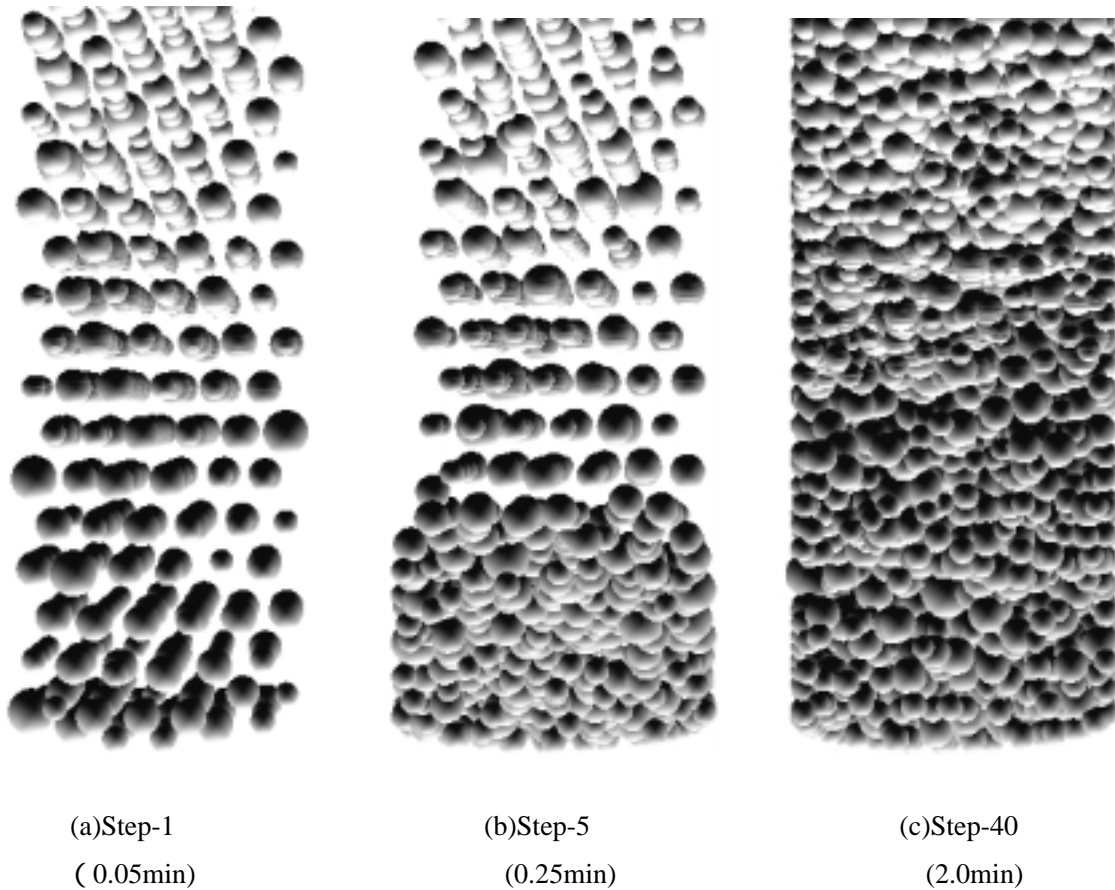


図 - 5 ポーラスコンクリートの充填過程

は外れてはいない。今後、さらに他の既往の研究のデータを集めてシミュレーションを行いながら精度を高めて行く予定である。

表 - 4 実験とシミュレーションの実積率比較

	実験結果	シミュレーション結果
配合 1	75.7%	79.4%
配合 2	74.3%	79.1%

3.2 連続空隙分布

図 - 6 に配合 1 と 2 の高さごとのポーラスコンクリート内の連続空隙分布を示す。連続空隙の算定の際、独立した空隙も同時に算定が可能であるが、全空隙に占める独立空隙の割合は配合 1 では 0.3%、配合 2 では 0.1% であり、ポーラスコンクリート内の空隙はほとんどが連続空隙

である。

また、配合 1 と配合 2 では実積率においてはそれほど大きな差はないが図 - 6 の連続空隙分布では配合 1 では上面（高さ 200mm 付近）と下面（高さ 0mm 付近）の連続空隙体積が大きく、その間は均等に分布しているのに対して、配合 2 では高さ 0mm 付近の連続体積が大きい、その他の連続空隙体積はほぼ均等に分布している。また、その影響は高さ 50mm ~ 150mm の空隙率を測定した場合、配合 1 が 22.2% に対して、配合 2 が 23.6% という結果に現れた。したがって、連続空隙分布によってポーラスコンクリートの透水係数などが異なることが考えられるので、この分布の違いによるポーラスコンクリートの物性の違いは今後検討する必要があると考えられる。

3.3 断面図

ポーラスコンクリートの連続空隙の算定結果

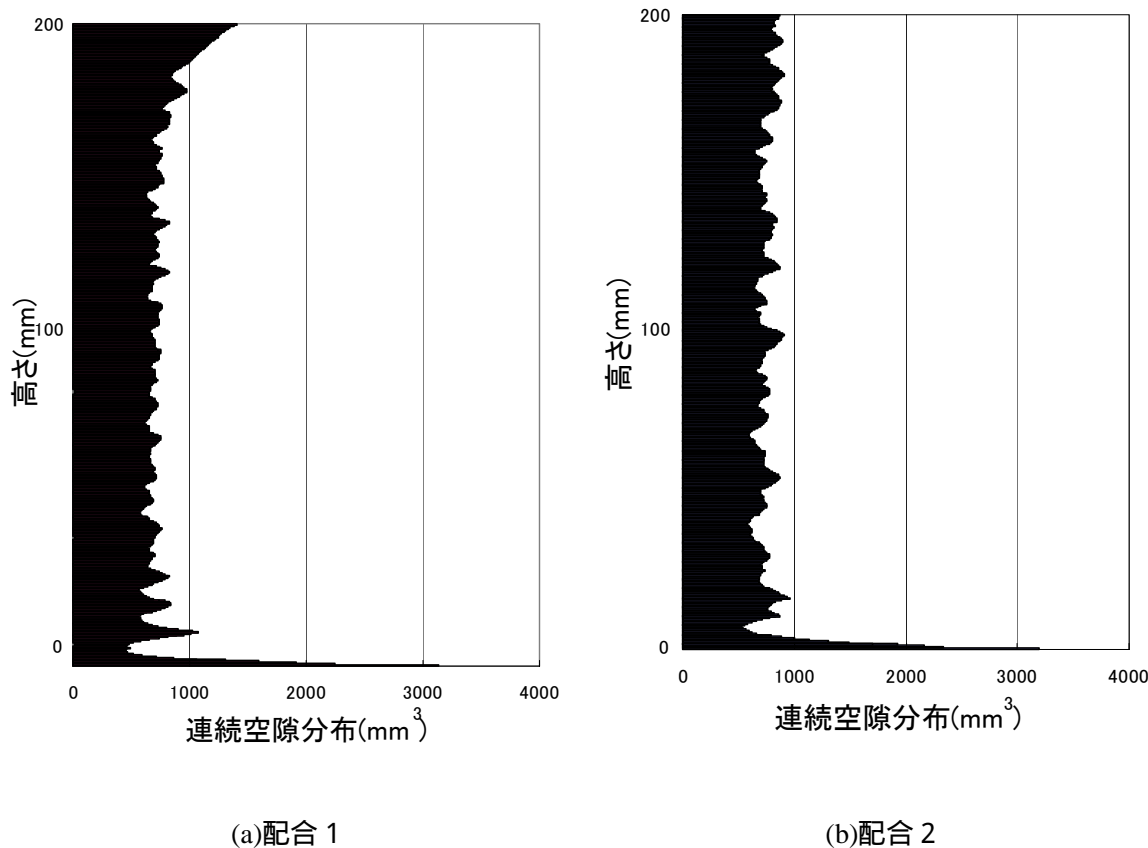


図 - 6 ポーラスコンクリート内の連続空隙分布

より、モデル化骨材、連続空隙、独立空隙が座標で表すことができ、その結果、図 - 7 のように、ポーラスコンクリートの断面図として図示することが可能であり、視覚的に非常に分かりやすいものとなり、配合 1 と 2 では粒径の違いがはっきり分かる。図に示される黒がモデル化骨材であり、水色（白黒では白色）が連続空隙であり、ほとんどないが赤が独立空隙である。

独立空隙はモデル化骨材が閉塞している箇所や型枠付近にあり、これらの結果は既往の研究⁴⁾通りである。しかし、算定の結果、独立空隙はそれほど多くはないことが示されている。

4. まとめ

本研究の範囲内で以下の知見が得られた。

1) 本研究では実験の再現性に関しては良い方であるが、今後シミュレーション量を増やしながら精度を上げるなどの課題もある。しかし、

ポーラスコンクリートの連続空隙を算定するまでの充填シミュレーションをほぼ完成できた。

2) 充填シミュレーションの結果、同じ様な実積率でも配合が異なる場合、連続空隙分布は異なる。

3) 全空隙に占める独立空隙の割合は非常に少ない。また、独立空隙のできる位置としては骨材や型枠で閉塞されたところである。

謝辞

本研究の一部は平成14年度ノーステック財団一般研究事業の補助を受けて行ったものである。

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集 Vol.24, No.1，

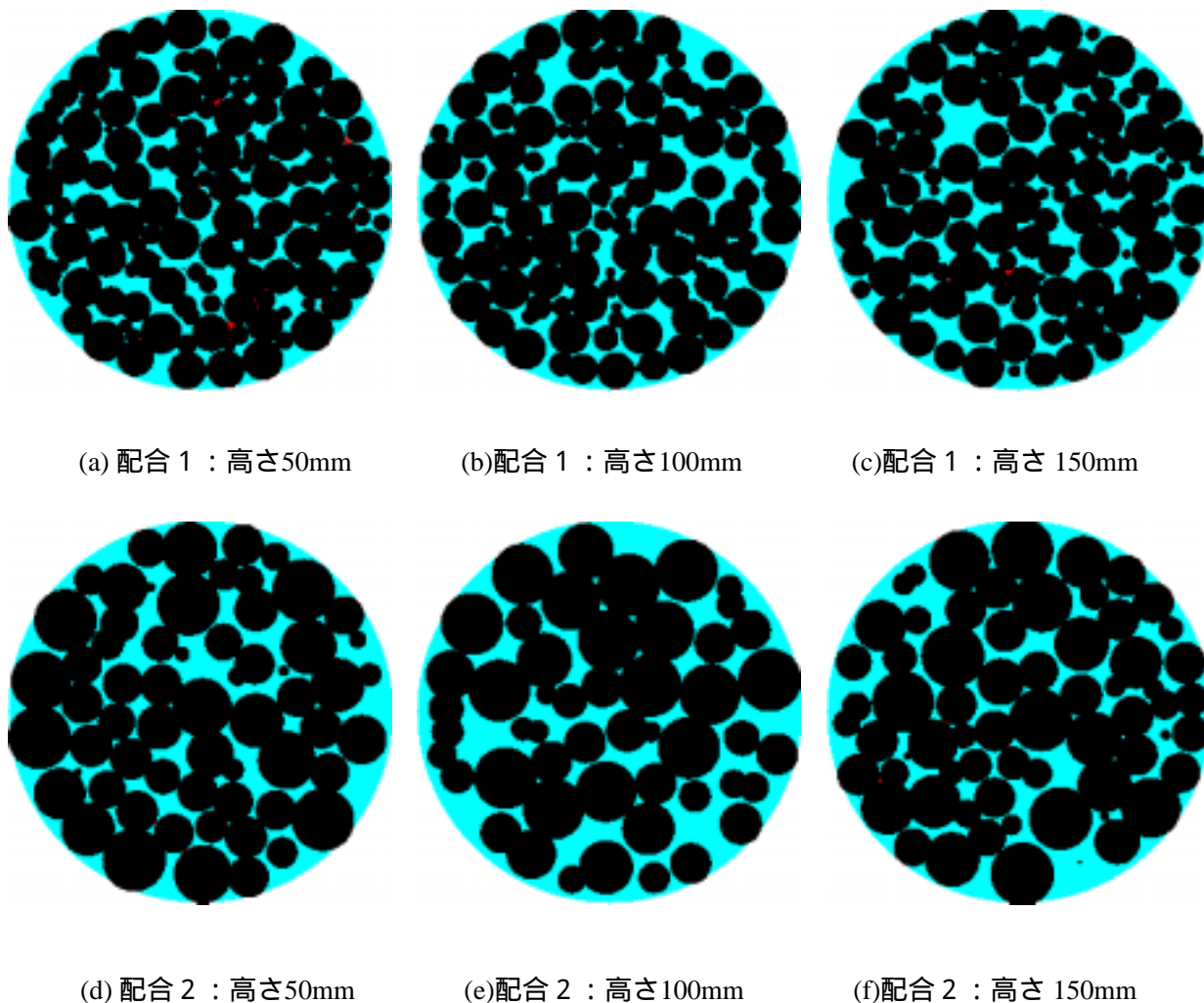


図 - 7 ポーラスコンクリートの断面図

- 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，コンクリート工学年次論文集 Vol.25, No.1, pp.1157-1162, 2002
 - 3) 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
 - 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) 伯野元彦：破壊シミュレーション，森北出版株式会社，1997
 - 7) 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
 - 8) 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