論文　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

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次元の充填シミュレーションを行ってきた。しかし，２次元の場合，奥行き方向の骨材移動が考えられないので，本研究では奥行き方向を考慮するために，充填シミュレーションを３次元に拡張した。拡張した結果，奥行き方向の骨材配置が明確になり，実際のポーラスコンクリートの形状をよく表した充填結果になるなど拡張した意義は大きいと思われる。また，骨材間の摩擦係数が大きい場合，骨材の充填が骨材間の摩擦力によって阻害されるために，ポーラスコンクリートの実積率が小さくなる傾向が見られた。

キーワード：ポーラスコンクリート，３次元充填シミュレーション，粒子要素法，実積率

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，環境保全という言葉を日常で大変多く耳にしている。このことは，コンクリートなどの建設材料に対しても当然のごとく求められている。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，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)]。しかしながら，２次元シミュレーションは３次元シミュレーションに比べて計算量が少ないという利点がある反面，供試体の奥行き方向に骨材が移動できないという欠点を有する。特に，ポーラスコンクリートでは重要な物性の一つとして透水係数が挙げられ，２次元での充填シミュレーションでは奥行き方向に水の移動ができないので透水係数を算定するのが難しく，３次元にシミュレーションを拡張する必要があると考えられる。そこで，本研究では２次元を３次元シミュレーションに拡張することを目的とし，拡張した際の配合・骨材間の摩擦係数のパラメータ変化についても同時に検討を行っている。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:3.16g/cm^3），粗骨材は沙流川産６号砕石（密度:2.79g/cm^3，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ＡＥ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。

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，基本的には既報の研究[1),2)]の２次元シミュレーションと同じ以下の仮定条件を設けた。

１）骨材は完全な球形である。

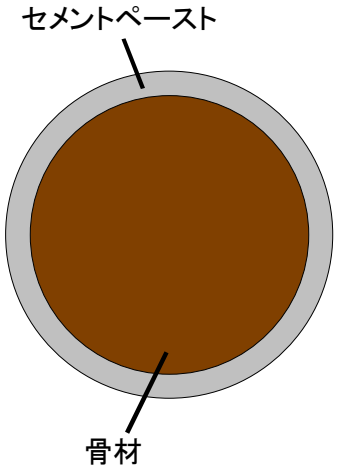
２）セメントペーストは骨材の周りに膜状にしかも均等に付着しており，ペーストのだれがない。（**図－１**）

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，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次元粒子要素法のプログラム[4)]を既往の研究[5)]を参考にして，３次元にプログラムを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[7)]を参考にして，２種類を設定した。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。

基本モデルも既報の研究[1),2)]と同じく，**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ーを設けている。

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。



図－１　モデル化骨材の概念図

表－１　解析に使用した配合の諸量

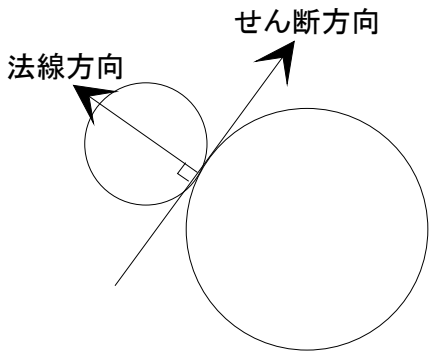
W/C	Gmax	s/a	p/a
0.25	13mm	0	0.25
			0.28
			0.30

表－２　シミュレーションで使用した骨材の粒径分布

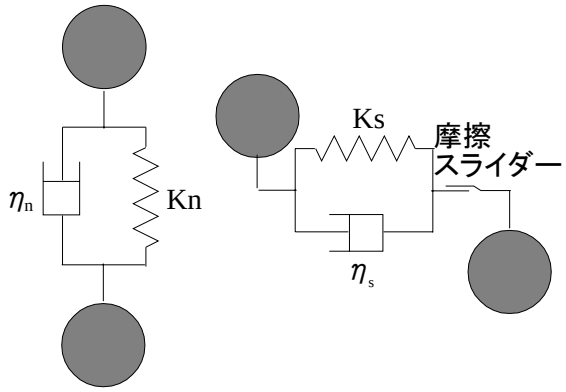
粒径(mm)	13	10	7
割合(%)	4	48	48

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/mm²)	型枠のヤング係数(N/mm²)	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	0.1



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

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

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

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。

$$e_n \leqq 0 \text{の時，} e_s=0 \tag{3}$$

$$e_s \geqq \mu e_n \text{の時，} e_s=\mu e_n \tag{4}$$

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

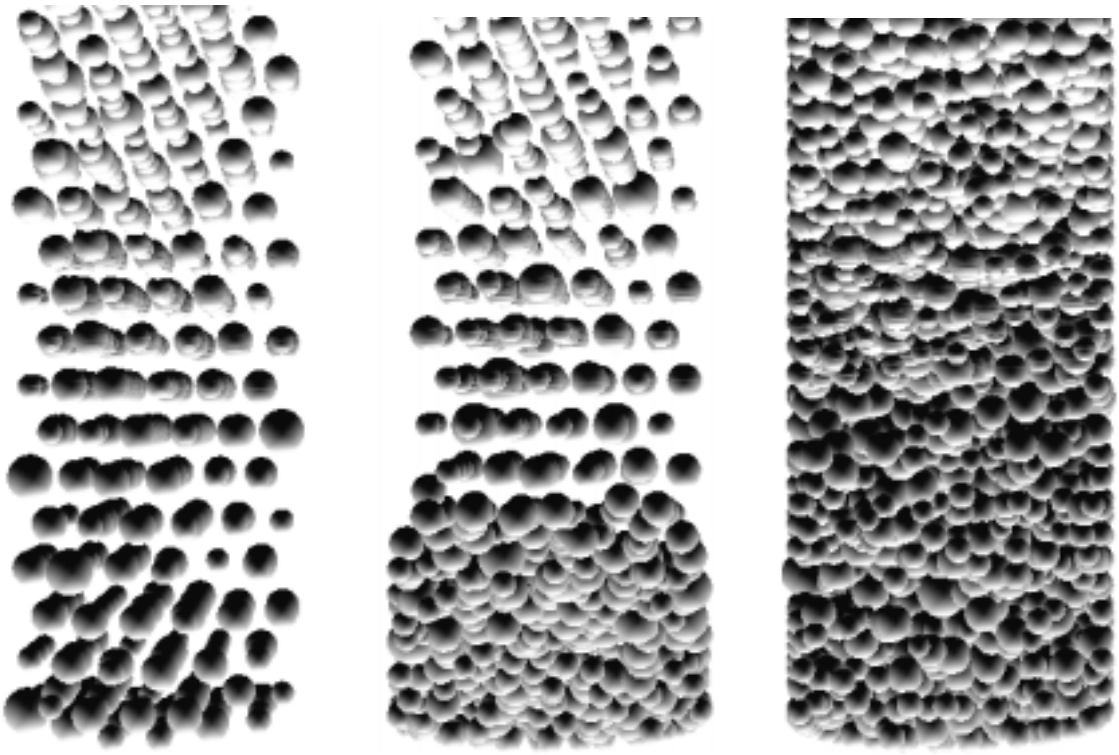
本研究のシミュレーションでは充填の際，ポーラスコンクリートの骨材が自由落下して，型枠に充填していくことを想定した。解析対象はφ100×200mmの円柱供試体を想定し，骨材投入開始後２秒もしくは平衡に達するまでシミュレーションを行った。 また，３次元シミュレーションでは計算量が多くなり，一台のパーソナルコンピュータで解析する場合，非常に多くの時間がかかるのでパーソナルコンピュータ四台での並列計算を行った。

３．シミュレーションの結果と考察

３．１　充填過程

図－４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る。３次元の場合，奥行き方向にモデル骨材が移動できる分，可視化などで図示した場合，**図－４**のように複雑であるが，２次元での充填結果以上にポーラスコンクリートの形状をよく表している。また，モデル化骨材一つ一つが要素なので，コンピュータ内に骨材の座標が記憶されているので，透水性や耐久性の解析の初期値として使用する場合，非常に有益であると考えられる。

表－４に既報の研究[2)]の２次元シミュレーションの実積率と本研究の３次元の実積率を示す。なお，ここで示された実積率はモデル化骨材の実積率である。この表に示されるように，摩擦係数が0.1の３配合では２次元と３次元では実積率にそれほど大きな差はなかったが，摩擦係数が0.3の配合においては約5%の開きがみられた。このことは実験データとの比較による３次元シ



(a)Step-1 (0.05min)　(b)Step-5 (0.25min)　(c)Step-40 (2.0min)

図－４　ポーラスコンクリートの充填過程（３次元解析）

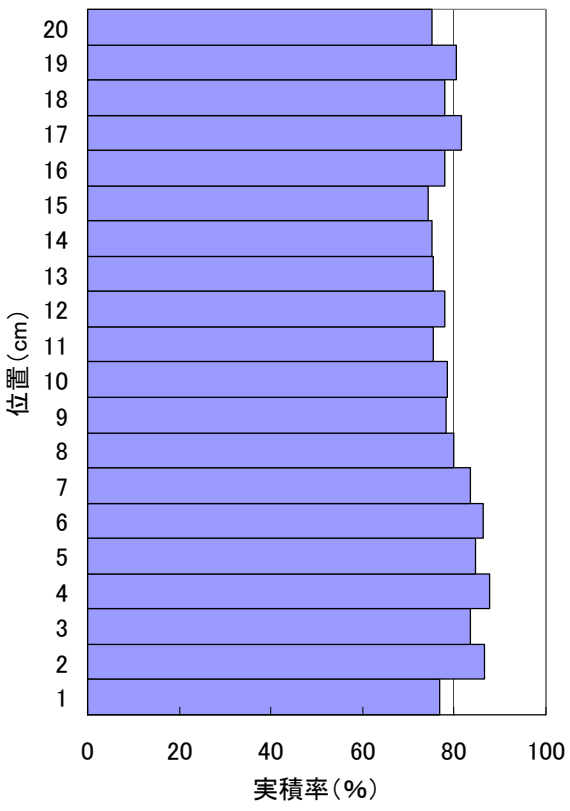
表－４　２次元と３次元シミュレーションの実積率比較

シミュレーション法	p/a=25% 摩擦係数0.1	p/a=28% 摩擦係数0.1	p/a=30% 摩擦係数0.1	p/a=25% 摩擦係数0.3
２次元実積率	79.2%	78.9%	78.3%	79.3%
３次元実積率	79.8%	79.1%	80.0%	74.2%

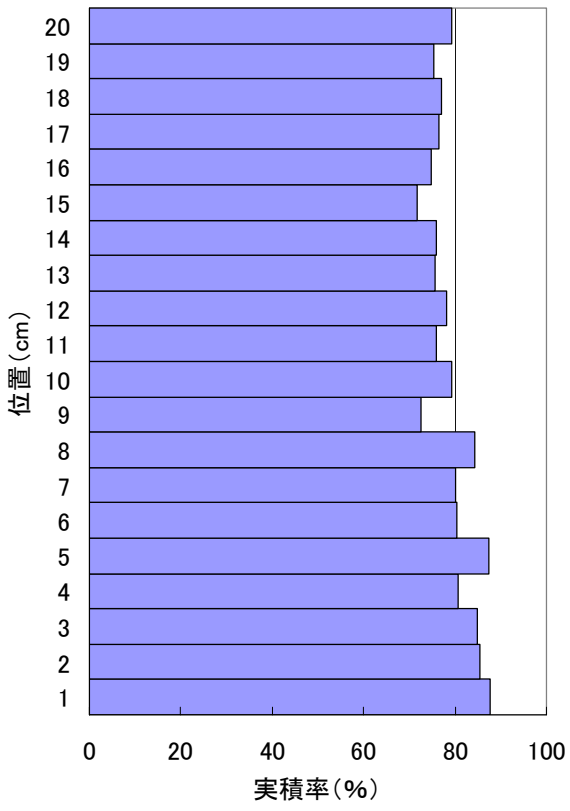
ミュレーションの可否の判定は必要であるが，ある摩擦係数では次元によって解析結果が異なってくることが示されており，奥行き方向の検討が必要であると考えられる。

３．２　セメントペースト容積比の影響

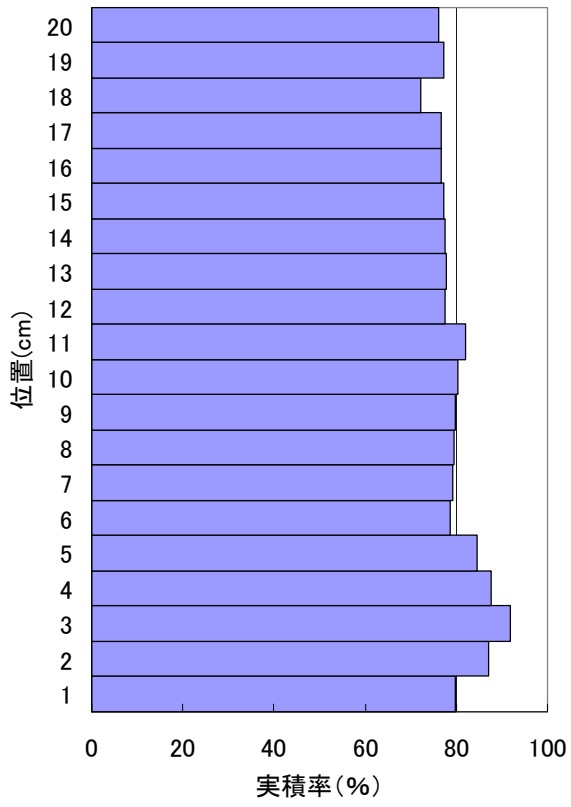
セメントペースト容積比の割合を変化させることにより，骨材の周りに付着するセメントペーストの膜の厚さが変化する。これが，充填シミュレーション結果にどう影響するかをここでは考察する。なお，モデル化骨材同士の摩擦係数は0.1と固定してシミュレーションを行っている。**図－４**で図示したポーラスコンクリートでは形状をよく表してはいるが，骨材の配置状況としては視覚的にも見づらい点があるので，ポーラスコンクリートを高さ方向に均等に２０分割した場合の実積率の分布を**図－５**に示す。シミュレーション結果は，p/a=0.25, 0.28, 0.30の順で，**図－５**(a),(b),(c)で示されている。**表－４**に示されているように，全体の実積率を比較した場合，あまり大きな差がない。また，充填分布を比較した場合，いずれの配合も供試体下部の方が上部と比較して実積率が大きくなる傾向がみられるが，配合によって特徴的な傾向は見られなかった。しかし，モデル化骨材の充填数と



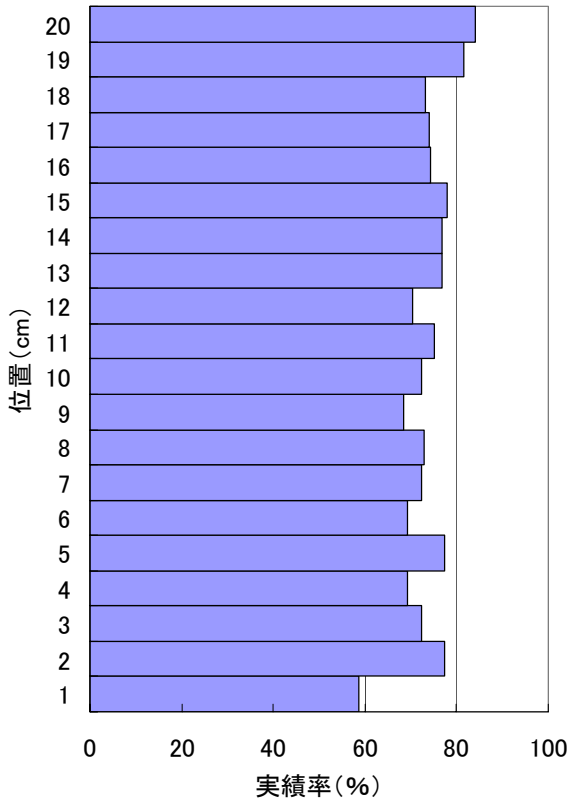
(a)p/a=25%，摩擦係数0.1



(b)p/a=28%，摩擦係数0.1



(c)p/a=30%，摩擦係数0.1



(d)p/a=25%，摩擦係数0.3

図－５　高さ方向に２０分割した実積率の分布

してはp/a=0.25, 0.28, 0.30の順で2567，2480，2422とモデル化骨材のセメントペーストの膜圧が厚くなるほど充填数が少なくなる傾向が見られた。

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，本研究では直接モデル化骨材同士の摩擦係数0.1と0.3で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で一定でシミュレーションを行っている。**表－４**に示されるように，実積率で約5.6%と大きな差が現れている。また，摩擦係数0.1と0.3の充填分布は**図－５**の(a)と(d)で示されているが，これらの図を比較した場合，(a)では供試体の下部の方が上部に比較すると実積率が大きい傾向がみられるが，(d)では供試体下部，特に最下部が極端に実積率が低い傾向が見られ，上部の方が実積率が大きい傾向が見られた。このことより，(d)の方が摩擦係数が大きい分，下部に骨材が充填するのを骨材の摩擦力によって阻害されたと考えられる。また，モデル化骨材の充填数としては摩擦係数0.1が2567，0.3が2357と実積率が低い方が充填数が小さいという当たり前の結果となった。

４．まとめ

本研究は既報の研究[1),2)]の２次元シミュレーションから３次元シミュレーションへと拡張したが，まだまだ萌芽的であり，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る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）２次元から３次元シミュレーションへとポーラスコンクリートの充填シミュレーションを拡張したが，奥行き方向の骨材の配置や空隙分布が明確になるなどの点から３次元に拡張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を変化させた場合でも，実績率にはそれほど大きな影響を及ぼさなかった。

３）モデル化骨材同士の摩擦係数が大きい場合，骨材の充填が骨材の摩擦力によって阻害され，実績率が小さくなる傾向が示された。

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：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）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，pp.1167-1172, 2002

３）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

４）粉体工学会：粉体シミュレーション入門，産業図書，1999

５）伯野元彦：破壊シミュレーション，森北出版株式会社，1997

６）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

７）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