

論文 ガラス球モデル内を流れる水の流動実験と MPS 法によるシミュレーションに関する基礎的研究

松岡 卓*1・Kamalova Zilola*2・畑中 重光*3

要旨：本報では、ガラス球の体心正方格子およびそこに小球を配置した格子モデルを用いて水平方向透水試験を行い、MPS 法によるシミュレーション解析結果との比較を行った。シミュレーションでは初期粒子間距離および動粘性係数を変化させた解析を行った。その結果、ガラス球の水平方向透水試験によって平均流速と動水勾配の関係は非線形であることが確認された。また MPS 法によるシミュレーション解析結果には初期粒子間距離の影響が大きいこと、解析によって流量および非線形透水指標の実験結果を概ね再現できることなどが示された。

キーワード：ポーラスコンクリート、MPS 法、水平方向透水性能、非線形透水挙動、非線形透水指標

1.1 はじめに

近年、集中豪雨の発生が増加しており、これに伴って洪水被害が増加する懸念がある。その原因として、降雨量が増加したこともあるが、都市化が進み、地表がコンクリートやアスファルト等に覆われ、雨水が地中に浸透しにくくなったことも考えられる。都市部での雨水は、抵抗の少ない排水管を通るため、雨水の流出速度は大きくなり、下流の河川等の増水は加速し、洪水の原因となる場合も生じる。この様な洪水被害の対策の一つにポーラスコンクリート（以下、POC と略記）を活用する試みが報告されている。POC は、内包する連続空隙により、透水性能・吸音性能等を有する環境共生型コンクリートである。特に、透水性能を活用した排水性・保水性・透水性舗装は、雨水を貯留できる点や雨水の流出速度を遅延させるなど洪水被害対策として有効と考えられる。

しかし、POC の透水性について日本コンクリート工学会が示した「POC の透水試験方法 (案) 2)」は鉛直方向の透水のみを対象としており、そのため水平方向の自由表面を持つ水の透水挙動についての研究は極めて少ないのが現状である。

本論文では、モデル化した POC で透水性能を把握し、MPS (Moving Particle Simulation) 法を用いた解析手法を提示することで、将来的に集中豪雨時のポーラスコンクリート舗装内の水の挙動を予測することを目指す。そこでガラス球を用いた流動実験を行うとともに、MPS 法を用いてこれを再現する。MPS 法とは格子を用いず、流体を粒子として計算する解析手法である。本報では、球を配列した格子モデルで POC を単純化して表現し、水平方向の透水挙動について実験およびシミュレーション解析を行った結果について報告する。

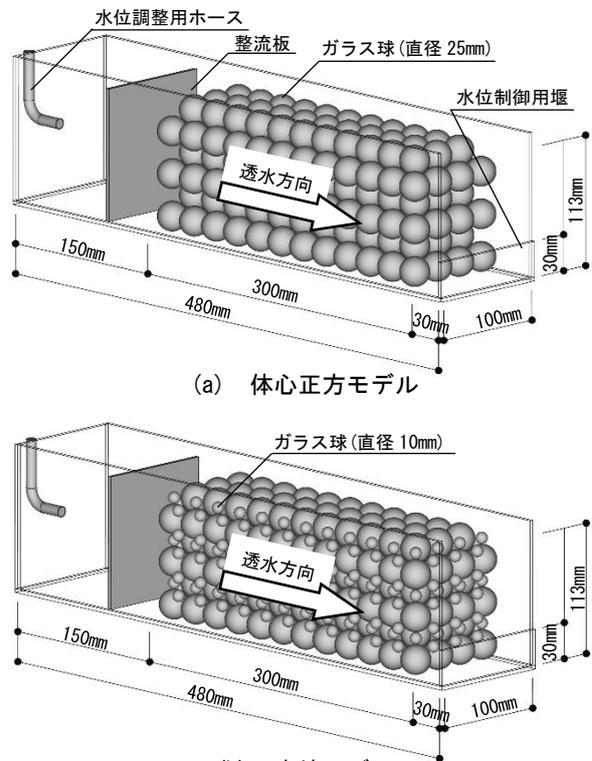


図-1 実験装置概要

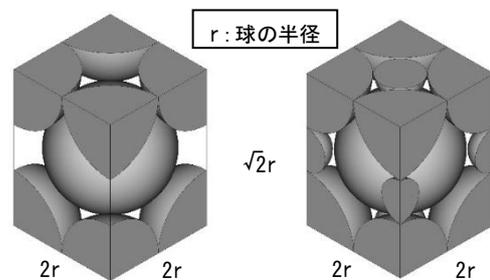


図-2 実験装置の単位格子

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士課程 (現在 ショーボンド建設株式会社)

*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生

*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工学 (博士) (正会員)

2. 検証実験

2.1 実験装置

本研究で用いた実験装置を図-1に示す。図-1(a)の試験体は図-2(a)に示す体心正方格子で直径25mmの球体を配置したモデル(以下、体心正方モデルと表記)で、図-1(b)の試験体は図-1(a)のモデルの隙間に直径10mmの球体を図-2(b)のように配置したモデル(以下、充填モデルと表記)である。既報³⁾の解析モデルは斜方格子配列であったが、本報では実積率が約74%(空隙率が約26%)で一般的なPOCの空隙率に近いこと、およびモデル作成の容易さを勘案して体心正方格子を採用した。格子モデルは流下方向に300mm、奥行方向に100mm、高さ方向に約113mmとした。それぞれのモデルの空隙率は体心正方モデルが約42%、充填モデルが36%である。配置した球はすべてガラス製品である。(ガラスは清浄であり、水の接触角は10度以下と考えられる。)注水面の水位は水位調整用のホースにより制御した。注水面と排水面の水位差を明確にするために排水側に堰を設け、その高さは30mmとした。整流板は注水の際に水の圧力を低減するために設置した。

2.2 実験方法

写真-1に実験状況の例を示す。注水面の水位を100mmで一定に保った定常状態において、流末から排出される水を10秒間測定した。各試験体について10回ずつ測定を行い、結果を平均して用いた。また、定常状態の内部水位も測定し、後述する動水勾配の算出に用いた。

2.3 実験結果

図-3に平均流速と動水勾配の関係を示す。なお、平均流速と動水勾配の関係は、既報⁴⁾で提示された式(1)によって近似し、平均流速は式(2)により算出した。文献⁵⁾によれば、デュブイの近似仮定を用いれば、式(3)に示したように、図-4における各点 H_n の水位差を各点間の距離で割ることで、動水勾配を算出することができる。

$$v = k'_{(m=0.5)} \cdot i^{0.5} \quad (1)$$

$$v = Q/A \quad (2)$$

$$i_n = (H_{n-1} - H_n) / X_n \quad (3)$$

ここに、 v : 平均流速(cm/s)、 $k'_{(m=0.5)}$: $m=0.5$ の時の非線形透水指標(以下、透水指標と略記)(cm/s)、 i : 動水勾配 Q : 流量(cm³/s)、 A : 流れの断面積(cm²)、 i_n : n 番目の動水勾配、 H_n : n 番目の水位(cm)、 X_n : 各点の距離(cm)

表-1に、測定された流量および図-3により求めた透水指標の値を示す。体心正方モデルは充填モデルに比べ、流量および透水指標が大きいことが分かる。これは、空隙率が大きいこと、空隙径が小さいことに加え、摩擦抵抗を生じる球体の総表面積、球体の径などが影響していると考えられる。式(1)の関係式は、決定係数 R^2



写真-1 実験の状況

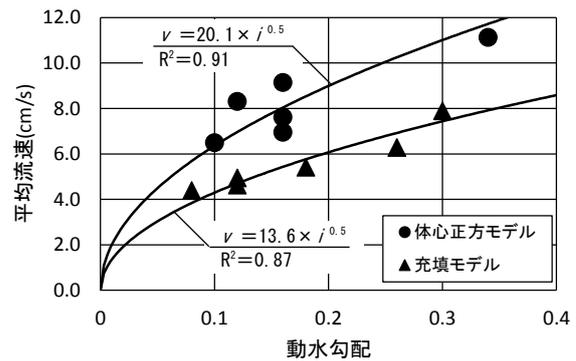


図-3 平均流速と動水勾配の関係

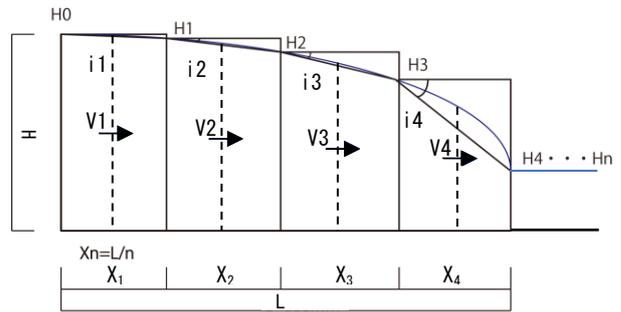


図-4 水平方向における動水勾配

表-1 流量および透水指標 k'

	空隙率 (%)	流量 (cm ³ /s)	$k'_{(m=0.5)}$ (cm/s)	R^2
体心正方モデル	41.6	640	20.1	0.91
充填モデル	35.7	431	13.6	0.87

の数値から判断して、ガラス球の実験値に対しても適用性が高いといえる。しかし、既報⁴⁾において提案された透水指標の推定式(4)を用いると、平均骨材粒径25mm、空隙率41.6%のときの透水指標 $k'_{(m=0.5)}$ の値は7.1cm/s程度であり、実験値はその約2.8倍となった。これは実験に使用したモデルでは、すべて空隙が連続であること、骨材と比較してガラス球は形状がなだらかであること等の理由で透水指標が大きくなったと考えられる。

$$k'_{(m=0.5)} = a \cdot \sqrt{V_R} - b \quad (4)$$

$$a = 0.0083 \overline{\varphi} a + 0.042$$

$$b = 0.11 \overline{\varphi} a + 0.54$$

ここに、 V_R : 空隙率(%), $\overline{\varphi a}$: 平均骨材粒径(mm)

3. MPS 法によるシミュレーション

3.1 シミュレーションモデルの概要

図-5 にシミュレーション解析に用いたモデルを示す。実験と同様の体心正方モデル (図-5(a)) および充填モデル (図-5(b)) を用いてシミュレーション解析を行った。シミュレーションモデルは図-1 と同じ寸法とした。

注水方法は、透水方向に向けて配置し、流入量は表-1 に示した実験値と同じ流量として、体心正方モデルが $640\text{cm}^3/\text{s}$ 、充填モデルが $431\text{cm}^3/\text{s}$ と設定した。既報^{3,7)} のシミュレーション解析では流入口を透水方向に向けて設置し、モデルと流入口の距離が近かった。その影響により、流体の流速が大きくなっていたことが考えられる。本報では、流入口による圧力を低減するために整流板を配置した。整流板は格子状の形状とし、流体粒子が通り抜けられるように格子のピッチは 10mm とした。解析時間を短縮するために、初期状態において流体粒子をモデル試験体内にあらかじめ配置させた。

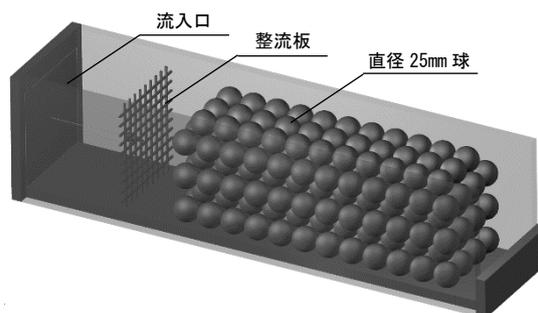
3.2 要因と水準

表-2 に本解析の要因と水準を示す。シミュレーションモデルは実験と同様に体心正方モデルおよび充填モデルである。流体粒子の初期粒子間距離は既報⁷⁾において検討されていたが、前述した流入口による圧力がかかっており、再度検討するために 2mm 、 1.75mm 、 1.5mm の3水準とした。流体の動粘性係数は実験の際に測定した水の温度および 20°C のときの動粘性係数を水準とした。なお、体心正方モデルの実験の際に測定された温度は 11°C で動粘性係数は $1.27 \times 10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$ 、充填モデルの際は 8°C で動粘性係数は $1.39 \times 10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$ 、 20°C の水の動粘性係数は $1.0 \times 10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$ である。

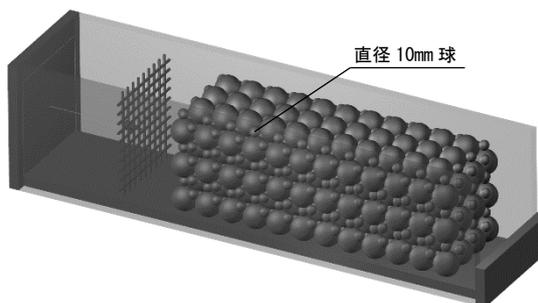
3.3 シミュレーション結果

(1) 流量

図-6 にシミュレーション結果の一例を示す。どの水準でも流入口付近で流体粒子が盛り上がり、越流を起こした。それより、本解析の水準では実験値と同じ流量を流すことができないことがわかった。本解析では、水面の堰を乗り越える粒子を測定することで流量を測定した。図-7 に流量に及ぼす初期粒子間距離の影響、図-8 に流量に及ぼす流体粒子の動粘性係数の影響を示す。図中には、表-1 に示す流量の実験結果に対する解析結果の割合を示す。図-7 より、どちらのモデルでも初期粒子間距離が小さくなるほど流量が増加することがわかる。また、初期粒子間距離を 1.75mm 以下にすると、実験値の 90% 以上の流量が得られる。図-8 より、流体の動粘性係数の影響については、両モデルともに大きな差異が見られなかった。以上より、流量の変動に及ぼす流体の



(a) 体心正方モデル



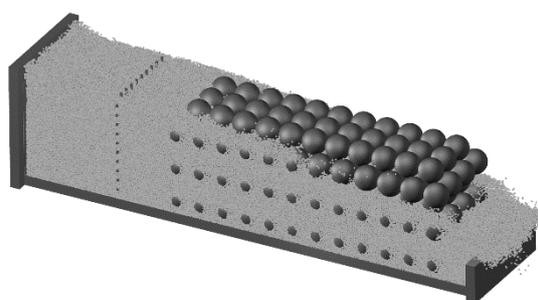
(b) 充填モデル

図-5 シミュレーションモデル図

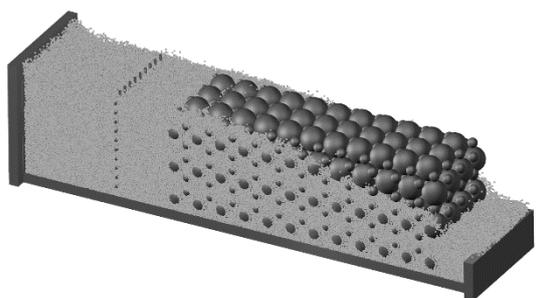
表-2 要因と水準

要因	水準
シミュレーションモデル	体心正方モデル, 充填モデル
初期粒子間距離 (mm)	2, <u>1.75</u> , 1.5
流体の温度	実測値, 20°C

— : 基準となる水準

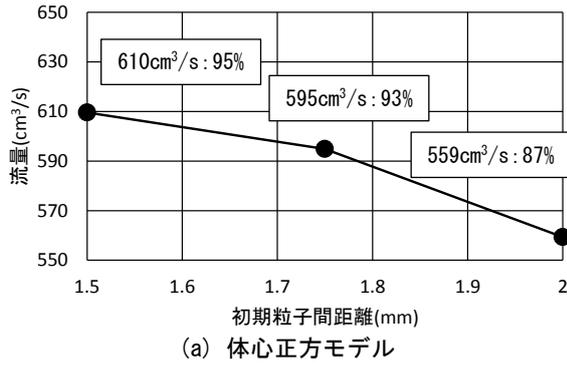


(a) 体心正方モデル

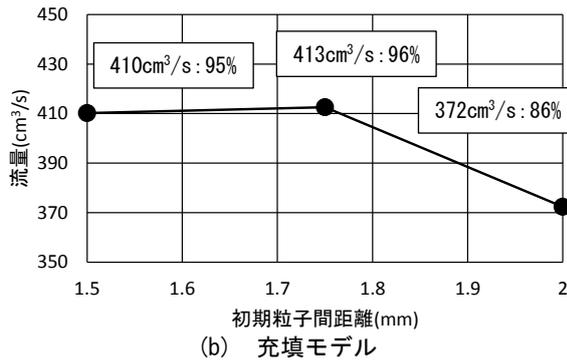


(b) 充填モデル

図-6 シミュレーション結果の一例
(初期粒子間距離 : 1.75mm , 流体の温度 : 実測値)

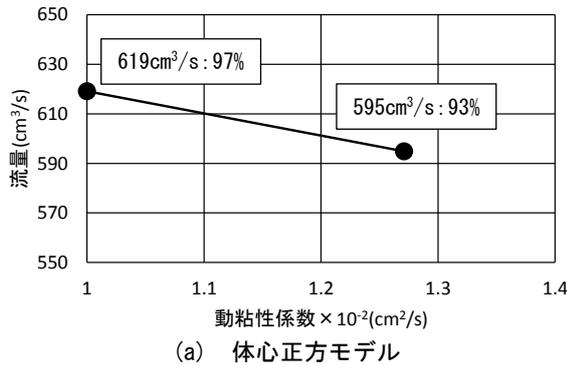


(a) 体心正方モデル

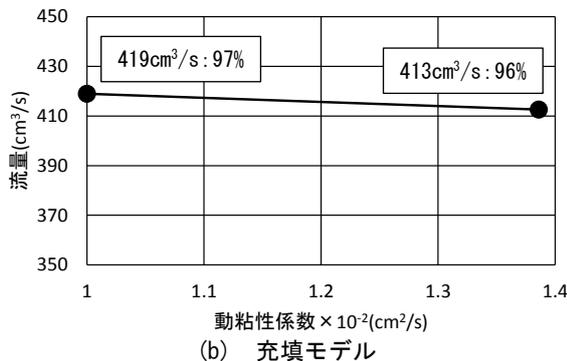


(b) 充填モデル

図-7 流量に及ぼす初期粒子間距離の影響

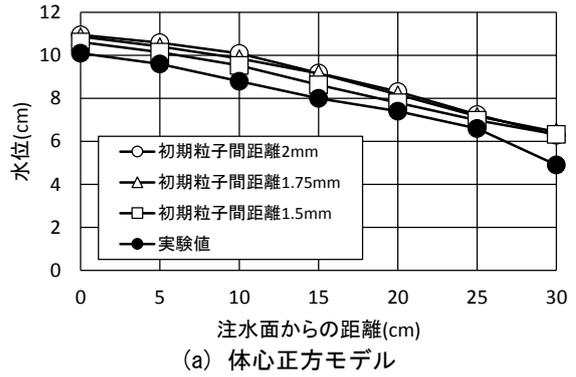


(a) 体心正方モデル

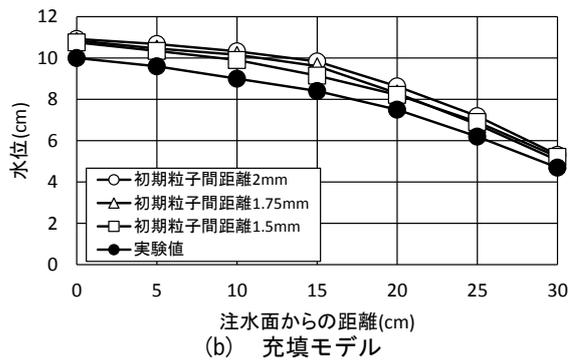


(b) 充填モデル

図-8 流量に及ぼす動粘性係数の影響

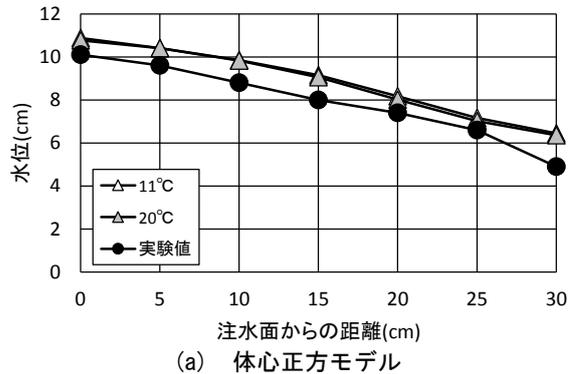


(a) 体心正方モデル

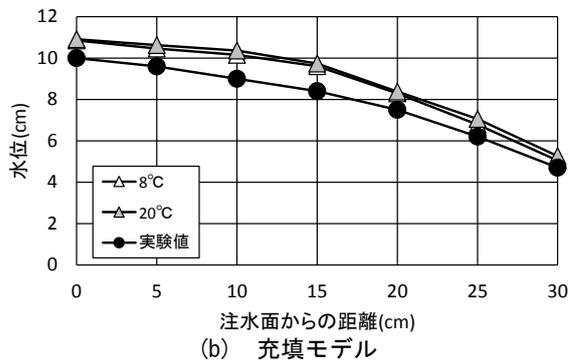


(b) 充填モデル

図-9 内部水位に及ぼす初期粒子間距離の影響



(a) 体心正方モデル



(b) 充填モデル

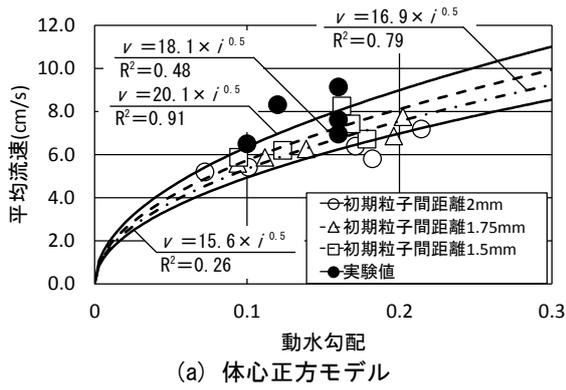
図-10 内部水位に及ぼす動粘性係数の影響

動粘性係数の影響はあまり大きくはなく、初期粒子間距離の影響が大きいことが示された。

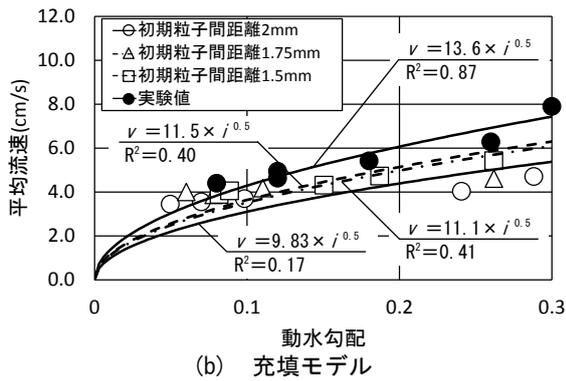
(2) 内部水位

図-9 に内部水位に及ぼす初期粒子間距離の影響、図-10 に内部水位に及ぼす流体粒子の動粘性係数の影響

を示す。全ての解析が実験値の内部水位よりも高い位置となる結果となった。図-9 より初期粒子間距離が小さくなるほど水位が低くなり、実験値に近づくことがわかる。図-10 の動粘性係数の影響は僅かで、グラフはほぼ重なっている。シミュレーションによる内部水位は実験

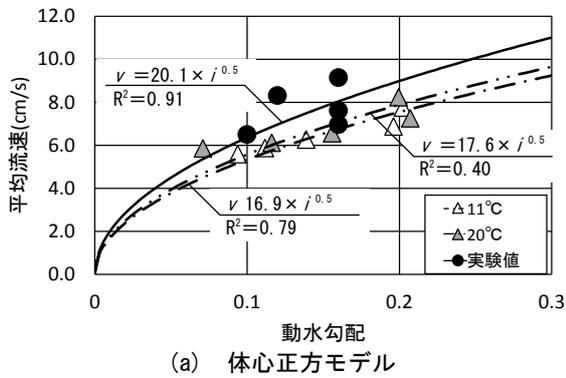


(a) 体心正方モデル

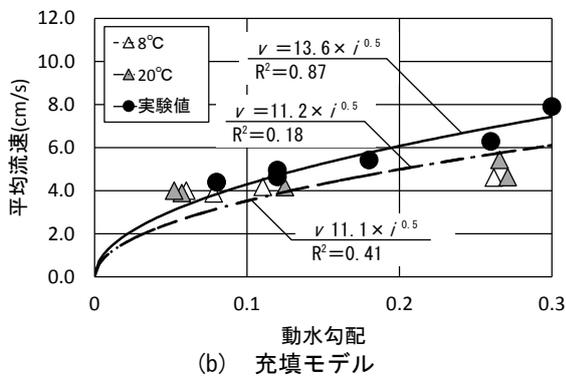


(b) 充填モデル

図-11 平均流速と動水勾配の関係
に及ぼす初期粒子間距離の影響



(a) 体心正方モデル



(b) 充填モデル

図-12 平均流速と動水勾配の関係に及ぼす
動粘性係数の影響

値と同じような曲線になっている。すなわち、初期粒子間距離をさらに小さい値とすれば実験を定量的に表すことができるのではないかと考える。

表-3 解析による透水指標 k'

シミュレーションモデル	初期粒子間距離 (mm)	温度 (°C)	$k'_{(m=0.5)}$ (cm/s)	R^2
体心正方モデル	2	11	15.6	0.26
	1.75	11	16.9	0.79
		20	17.6	0.40
充填モデル	2	8	9.83	0.17
	1.75		11.1	0.41
	1.5	20	11.2	0.18
		8	11.5	0.82

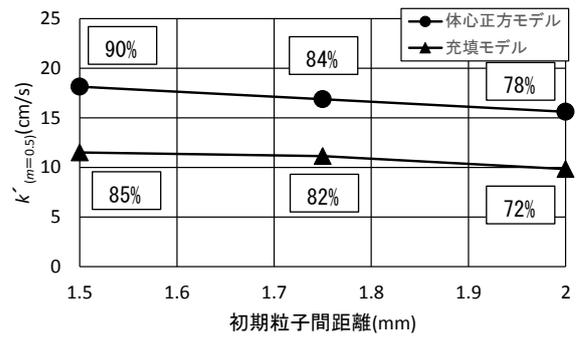


図-13 透水指標に及ぼす初期粒子間距離の影響

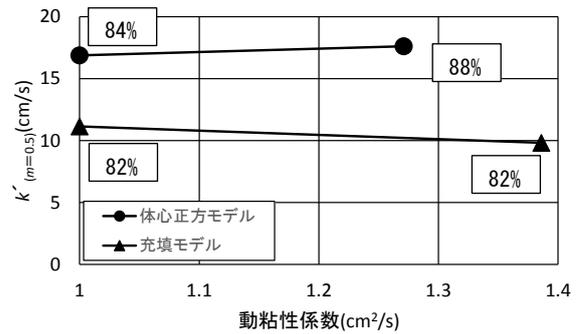


図-14 透水指標に及ぼす動粘性係数の影響

(3) 平均流速と動水勾配の関係

式(1)~(3)を用い、本解析の平均流速と動水勾配の関係を求めたものを図-11 および図-12 に示す。図中には実験値および式(3)による近似曲線を併示した。表-3 に透水指標および決定係数を示す。解析結果はすべての水準が実験値の透水指標を下回った。図-11 によれば、両モデルともに初期粒子間距離が小さくなるほど透水指標は大きくなり、実験値に近づく傾向を示した。図-12 の動粘性係数には大きな変動は見られなかった。図-13, 14 に透水指標に及ぼす各種要因について示す。同図には実験値に対する解析の透水指標の割合も示した。最も実験値に近づく水準はどちらのモデルでも初期粒子間距離が1.5mm のときである。透水指標の値から判断して、概ね実験を解析的に再現できているといえよう。

ただし、透水指標の値は通常の POC から得られる値と比べるとかなり大きい。今後、POC に使用される骨材粒

径により近い寸法の球を用いること、空隙形状をより現実に近づけることなど、実際の POC に近いモデルを作成してシミュレーション解析を実施したい。また、モデルと流体の摩擦抵抗を含めた解析も必要である。

4. まとめ

本報では、ガラス球を用いた格子配列モデルで水平方向透水試験を行い、同様なモデルに対して行った MPS 法によるシミュレーション解析の結果と比較した。

本研究により、以下の知見を得た。

- (1) ガラス球を用いた格子配列においても平均流速と動水勾配の関係は非線形であることが示された。
- (2) MPS 法でのシミュレーション解析において、モデル内部の流動に初期粒子間距離の影響が大きいことが分かった。
- (3) 実験により得られた流量および透水指標をシミュレーション解析によって概ね再現することができた。

謝辞

本研究費の一部は科学研究費補助金 基盤研究(B) (研究代表者: 畑中重光) によった。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中川武志, 浦山益郎, 畑中重光, 三島直生: 都市型水害の減災に資する地盤内の水流制御技術の開発研究 (その 2: 水害対策法の提案), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.207-208, 2013.8
- 2) 日本コンクリート工学会: 性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立に関する研究委員会報告書, pp.336-339, 2015.6
- 3) 松岡卓, 三島直生, 畑中重光, 関本亮太: MPS 法を用いたポーラスコンクリートモデル中を流れる水の流動シミュレーション, コンクリート工学会年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1501-1506, 2017.7
- 4) 関本亮太, 松岡卓, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの非線形透水挙動のモデル化と街区からの排水シミュレーション, コンクリート工学会年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1507-1512, 2017.7
- 5) 山口柏樹: 土質力学 (全改訂), 技報堂出版, pp.53-64, 1984
- 6) 松岡元: 土質力学, 森北出版, pp.32-53, 1999
- 7) MPS 法を用いたポーラスコンクリート内の流動挙動に及ぼす粒子間距離の影響に関する基礎的研究: 松岡卓, 三島直生, 畑中重光, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.81-82, 2017.8