

# 論文 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

松岡 卓\*1・三島 直生\*2・畑中 重光\*3・関本 亮太\*4

**要旨:** 本報では、MPS 法を用いてポーラスコンクリート内部の水の挙動を把握するために、ポーラスコンクリートの内部構造を球の配列として単純化したモデルを用いて流動シミュレーションを行い、その妥当性を既往の実験結果との比較で評価した。解析は二次元と三次元で行った。その結果から、二次元の解析結果では、実験結果と同様に壁効果の影響を確認でき、壁効果の影響により水の流量および透水量の増加傾向が定性的に示された。二次元および三次元の解析結果より、流速と動水勾配の関係は、非ダルシー則、すなわち非線形挙動を呈すると見なすのが妥当であることが確認された。

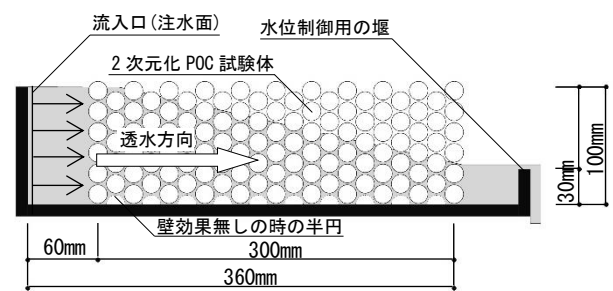
**キーワード:** ポーラスコンクリート, MPS 法, 水平方向透水性能, 透水挙動, 流速分布

## 1. はじめに

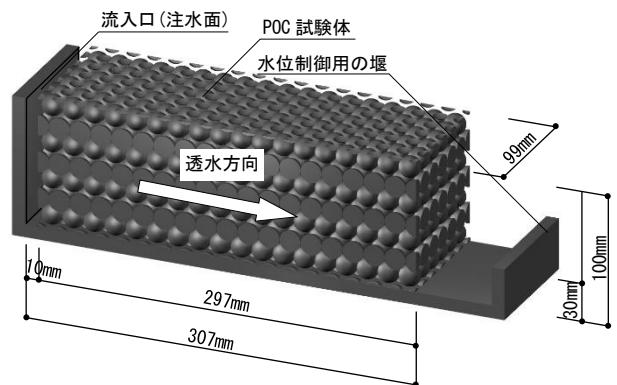
近年、集中豪雨の増加に伴い、洪水被害の増加が懸念されている。その原因として、降雨量の増加もあるが、都市化が進み、地表がコンクリートやアスファルト等に覆われ、雨水が地中に浸透しにくくなったことも考えられる。都市部での雨水は、抵抗の少ない排水管を通るため、雨水の流出速度は大きくなり、下流の河川等の増水は加速し、洪水の原因となる場合も生じる。このような洪水被害の対策の一つにポーラスコンクリート(以下、POC と略記)を活用する試みが報告されている。POC は、内包する連続空隙により、透水性能・吸音性能等を有する環境共生型コンクリートである。特に、透水性能を活用した排水性・保水性・透水性舗装は、雨水を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。加えて、現場打ちされる POC は、路盤や型枠に接する部分とそれ以外の部分で空隙率が異なる。これは、壁効果またはせき板効果と呼ばれる。この影響により空隙率が大きくなり、水が流れやすくなるため、壁効果は透水性能に大きく影響を与える 3) 4)。雨水の流出予測や制御を行うためには、これらの要因の把握は不可欠となる。

本研究は、MPS (Moving Particle Simulation) 法を用いて POC 内部の水の挙動を把握することを試みる。MPS 法は格子を用いず、流体を粒子として計算する解析手法である。本報では、POC を単純化した球を配列したモデル



(a) 二次元モデル



(b) 三次元モデル

図-1 シミュレーション概要

ルを仮定し、水平方向の透水挙動について解析を行い、その妥当性の評価を行う。

## 2. シミュレーション概要

### 2.1 シミュレーションモデル

本研究では、二次元モデルおよび三次元モデルでの解析を行った。二次元モデルでは、既報 5)において検討された POC 二次元可視化モデル実験を参考に、図-1(a)の

\*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

\*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授 博士工学 (正会員)

\*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)

\*4 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 修了生 修士 (工学)

解析モデルを作成した。φ16mmの円を、POCのセメントペーストと粗骨材に当たる固相と考え、円の中心間の距離を実際のPOCの空隙率と近い空隙面積率となる17.6mmとして整列配置した。その結果、二次元モデルの断面積に対する空隙の断面積の比率から空隙面積率は約25%となった。円形の固相のみを配置した場合には、型枠面近傍に空隙率の大きな領域ができる。これを壁効果と称するが、この壁効果無しモデルとしては、円形モデルと同様の配置で半円を型枠面近傍に挿入した。この場合の空隙面積率は約23%である。また、図-2に示すように円の中心間距離を一定にし、固相直径を14mm、12mmと変化させて、空隙の幅を大きくしたモデルも作成した。

三次元モデルは、図-1(b)に示すようにPOCの内部構造を球体の配列に単純化したものとした。球体の配列は、粗骨材の実積率に近くなる斜方格子配列<sup>9)</sup>を採用した。ただし、セメントペースト分を再現するには至っておらず、空隙率は約48%となっているため、本報では定性的な評価のみを行う。球の直径は5号砕石の平均骨材粒径である16.5mmとした。モデル試験体は、流下方向が297mm、高さ方向は約100mm、奥行き方向が約100mmであるが、解析負荷を低減するために、POC試験体の奥行き方向を格子配列の最小単位である16.5mm幅の要素の繰返しであると考える、この部分のみを解析対象とした。この場合、流体の挙動は境界面を挟んだ対称流動となり、数値解析上は奥行きの影響はないと考えられる。

注水方法は、注水面と同じ高さの流入口を設置し、水位を一定に保持できる流量となるように設定した。排水面の堰は、注水面と排水面の水位差を明確にするために排水面で高さを制御する目的で設置している。解析時間を短くするために、初期状態において流体要素である粒子(以下、単に粒子)をモデル試験体内にあらかじめ配置させた。初期粒子を正方格子で配置したところ、圧力が高くなり振動を起こした。そのため、粒子の初期配置は、粒子の中心間距離の1.01倍に設定した。

## 2.2 要因と水準

表-1(a)に二次元モデル、表-1(b)に三次元モデルを用いた本解析の要因と水準を示す。

二次元モデルの場合、空隙面積率の変化を表現するために、POCモデルの直径を変化させた。POCモデルの直径とは、図-1(a)に示す二次元POCモデル供試体の円形固相の直径であり、既報<sup>9)</sup>の実験的研究と同様の16mmから、中心間の距離を一定にし、14mm、12mmと変動させて、すなわち、空隙の幅を大きくして解析を行った。その結果、空隙面積率は表-2に示す値となった。本解析では空隙面積率の違いによる、解析結果の変化を明確にするため、空隙面積率を実際のPOCの空隙率と比べて

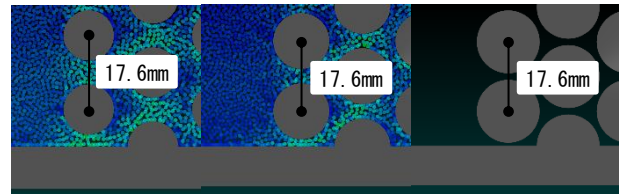


図-2 二次元モデルの詳細

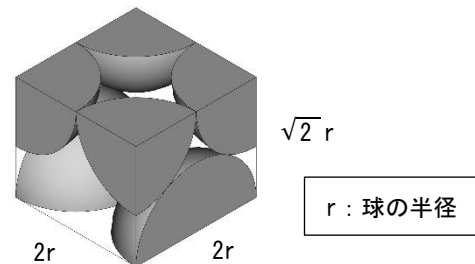


図-3 斜方格子

表-1 要因と水準

(a) 二次元モデル

要因	水準
POCモデル(円形固相)の直径(mm)	(16), 14, 12
注水面の水位(mm)	100, 75, 50
壁効果	有, 無
粒子間距離(mm)	1

(b) 三次元モデル

要因	水準
注水面の水位(mm)	100, 75, 50
粒子間距離(mm)	(1), 0.75

表-2 二次元モデルの空隙面積率

円形固相の直径(mm)	壁効果	空隙面積率(%)
16	無	23
	有	25
14	無	40
	有	43
12	無	56
	有	58

大きくしている。ここで、POCモデルの直径が16mmに関して、下部のPOCモデルと壁の間隔が0.8mmとなり、流体要素の粒子間距離を1mmとした場合、粒子の速度が極端に上昇し、解析が停止した。粒子間距離をさらに小さくした場合、解析時間が膨大となり、現実的でないので粒子間距離は1mmの一定とした。注水面の水位および壁効果については、2.1に記した通りである。表-1(b)に示した三次元モデルの場合、粒子間距離は、1mmおよび0.75mmで解析を行った。ここで、三次元モデルにおいても粒子間距離が1mmの場合では、粒子の詰まりが発生し、解析が困難になった。また、三次元解析では、壁効果の影響は取り扱っていない。

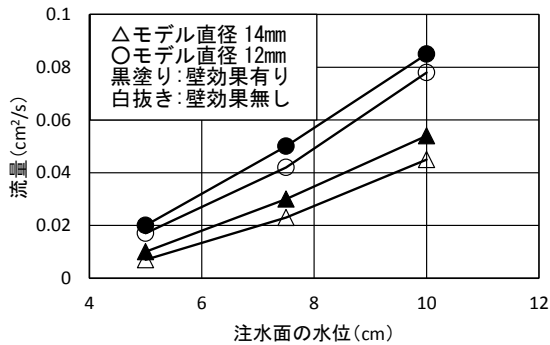


図-4 二次元モデルにおける流量と注水面の水位の関係

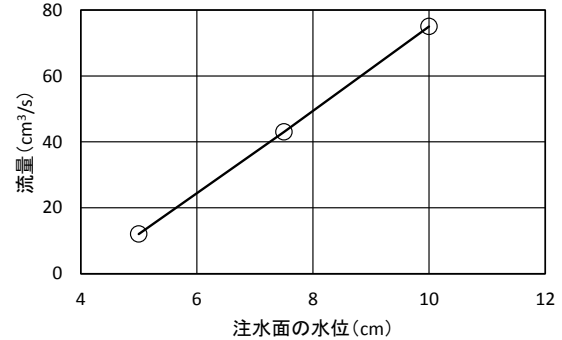


図-5 三次元モデルにおける流量と注水面の水位の関係

### 3. シミュレーション結果

#### 3.1 流量と注水面の水位の関係

二次元モデルにおける流量と注水面の水位の関係を図-4に、三次元モデルにおける関係を図-5に示す。なお、二次元の解析は奥行がないため、流量の単位系は $(\text{cm}^2/\text{s})$ である。

図-4によれば、流量は、壁効果有りの方が壁効果無しに比べて大きいという結果となった。これより、MPS法においても壁効果の影響で、底部付近の流量は増加することが確認できる。

POCモデルの直径に関しては、直径が小さくなるほど、間隙が大きくなるため、直径が14mmよりも12mmの方が流量は大きくなっている。既報の実験結果<sup>5)</sup>を試験体の幅で除した流量は、壁効果有りの場合 $11.7\text{cm}^2/\text{s}$ 、壁効果無しの場合 $9.8\text{cm}^2/\text{s}$ であった。本解析結果は実験供試体より空隙率が大きくなっているため、さらに流量が大きくなるべきところであるが、これらの値を大幅に下回った。この一因として、POCモデルの直径が16mmで発生したのと同様な、粒子間距離と固相間距離の比に起因する解析誤差が挙げられる。

図-4および図-5によれば、二次元および三次元モデルともに水位が上昇するにつれて流量は増加しており、流量と注水面の水位の間には、正比例の関係があることが分かる。この傾向は実際のPOCを用いた、水平方向の透水試験の結果<sup>7)</sup>を定性的には再現できている。

#### 3.2 流速と動水勾配の関係

文献<sup>8), 9)</sup>によれば、デュブイの近似仮定を用いれば、式(1)により、図-6における各点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。

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

ここに、 $i_n$ : 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)

この動水勾配と各区間の平均流速から、式(2)中の、係数 $k$ を求めた。図-7に流速と動水勾配の関係を示す。なお、式(2)における累乗指数 $m$ は、管水路における平均流速などを求めるマニング式やジェシー式を参考に、平

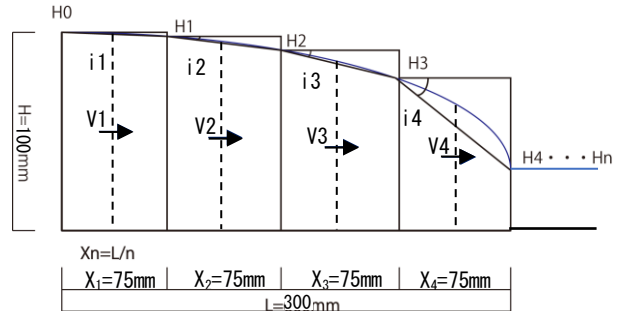


図-6 水平方向における動水勾配

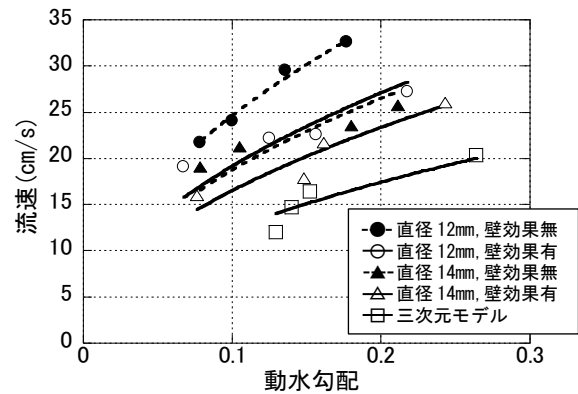


図-7 流速と動水勾配の関係

表-3 係数  $k' (m=0.5)$

POCモデル		壁効果の有無	係数 $k' (m=0.5)$ ( $\text{cm}/\text{s}$ )	$R^2$
二次元	14mm	無	52.2	0.93
		有	59.3	0.63
	12mm	無	60.6	0.75
		有	77.9	0.99
三次元モデル		無	39.0	0.92

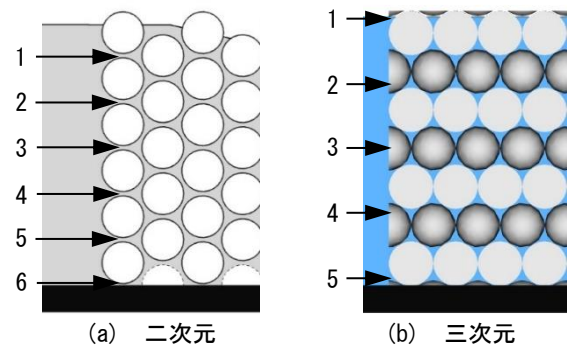
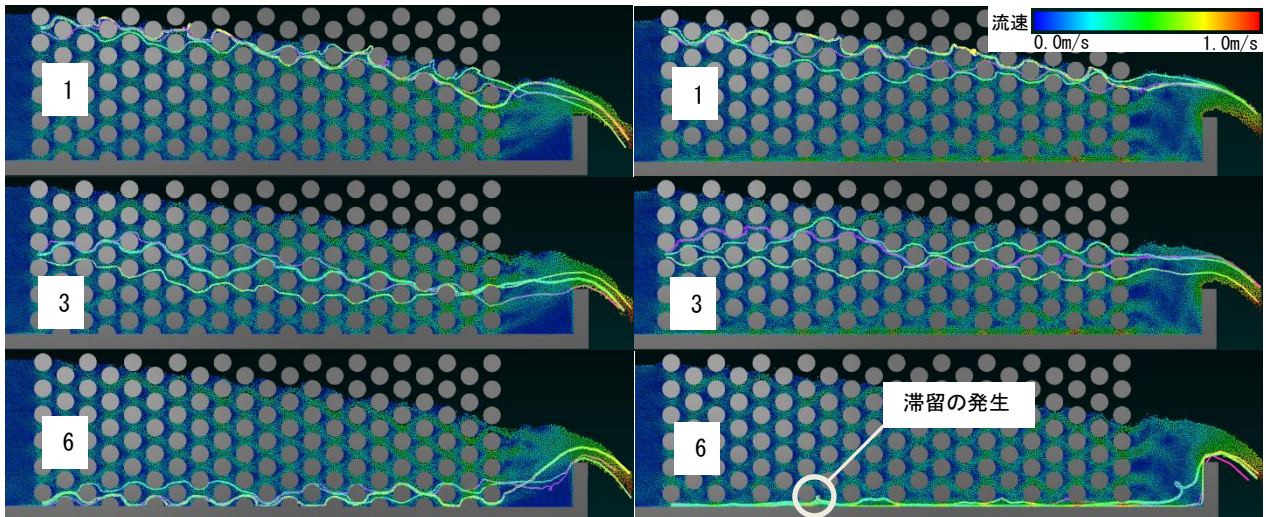


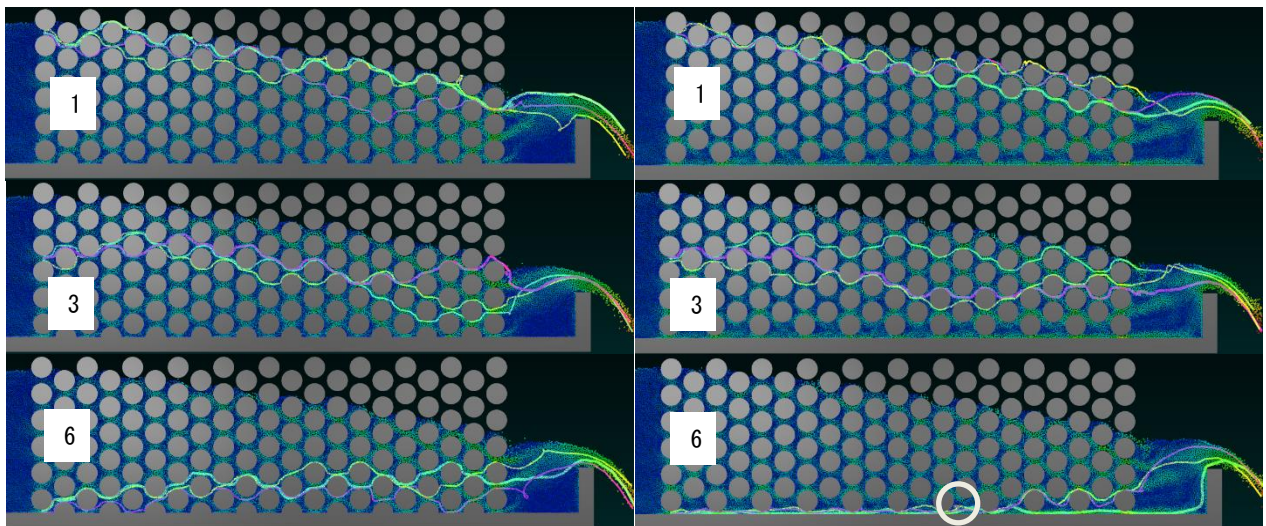
図-8 粒子の流入位置





(a) モデル直径 12mm, 壁効果無し

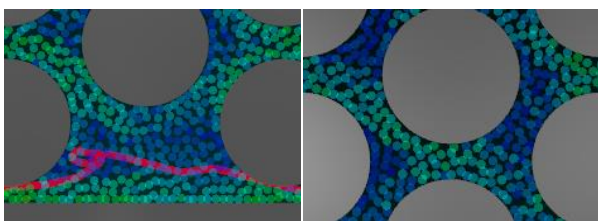
(b) モデル直径 12mm, 壁効果有り



(c) モデル直径 14mm, 壁効果無し

(d) モデル直径 14mm, 壁効果有り

図-9 粒子の軌跡(二次元)



(a) 滞留箇所

(b) 滞留上部

図-10 図-9(d)の粒子6の拡大図

均流速は動水勾配の 1/2 乗に比例する<sup>10)</sup>と仮定して、0.5で算出した。

$$v = k'_{(m=0.5)} \cdot i^{0.5} \quad (2)$$

ここに、 $v$ :流速(cm/s),  $k'_{(m=0.5)}$ :  $m=0.5$ における非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数(以下、係数 $k'_{(m=0.5)}$ ),  $i$ :動水勾配{=水位差(cm)/供試体長さ(cm)}

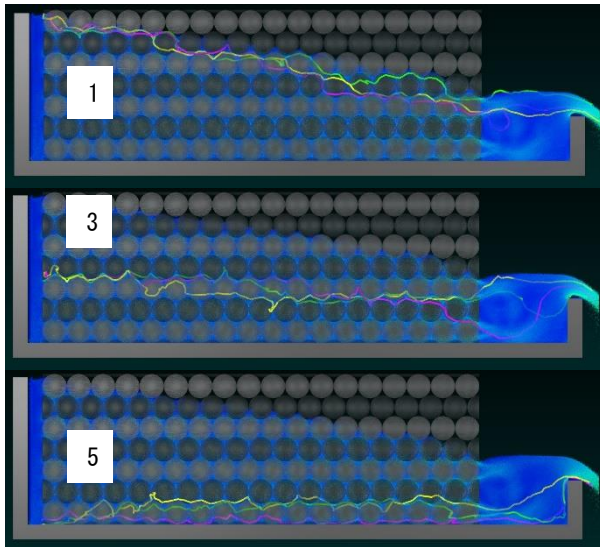
表-3は、図-7より求めた係数 $k'_{(m=0.5)}$ の値である。係数 $k'_{(m=0.5)}$ の値は壁効果の影響で大きくなり、また空隙率が大きくなっても、増大する。夏目ら<sup>4)</sup>によるPOCの

定水位透水試験結果の係数 $k'$ は5cm/s程度であるが、三次元の解析結果では、39cm/sと解析結果の方が大幅に大きくなった。これも、粒子間距離と固相間距離の関係が影響していると考えられる。式(2)の累乗関数 $m$ を0.5とした場合、流速と動水勾配の関係は、決定係数 $R^2$ の数値から判断して、かなり強い相間があるといえる。

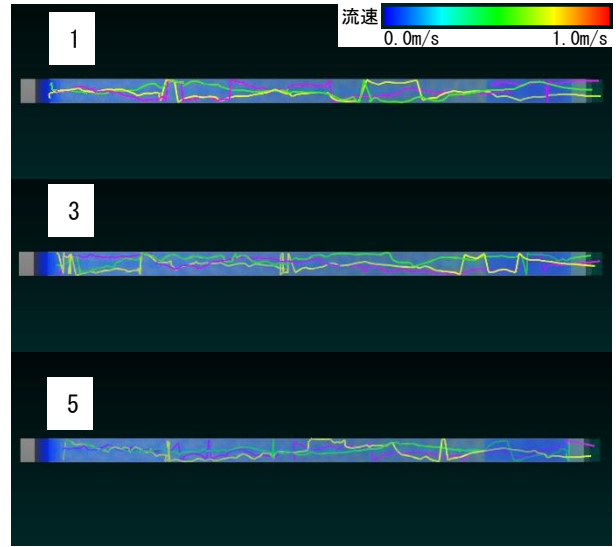
### 3.3 粒子の軌跡

注水面の水位が100mmの水準における流入位置毎に3つの粒子の軌跡をそれぞれのモデルで追った。ここで、軌跡の色は、単に軌跡を区別するためのものであり、背景の粒子の色が流速を示している。粒子の流入位置を図-8に示す。軌跡を追う粒子の流入位置は上部から、二次元解析で1~6とし、三次元解析では高さ方向に5等分し、その付近から流入する粒子を上部から1~5と番号を振った。図-9に二次元解析、図-11に三次元解析の粒子の軌跡を抜粋して示す。

二次元解析における粒子の軌跡で、上部から流れる粒子1は、水流上部の自由表面付近を流動しているのがわ

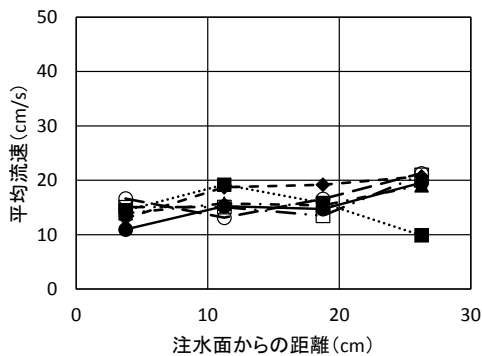


(a) 立面画像

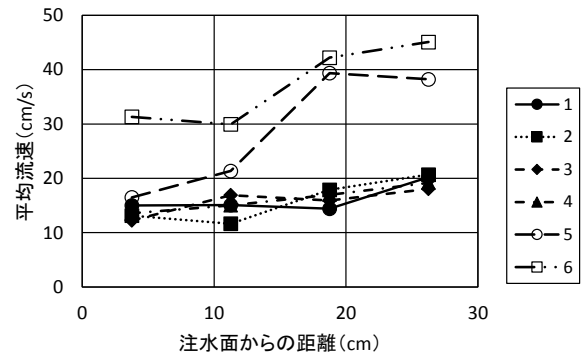


(b) 平面画像

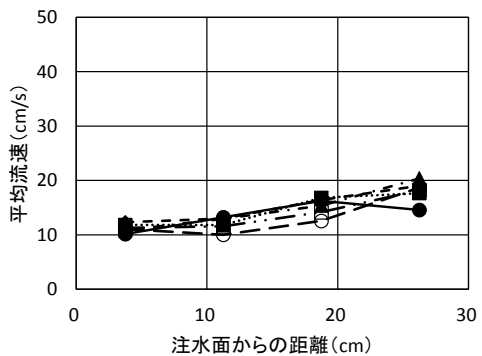
図-11 粒子の軌跡(三次元)



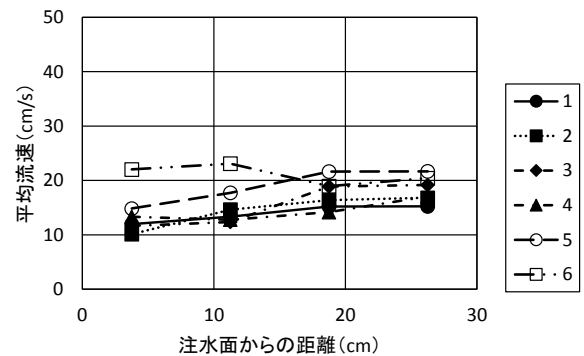
(a) モデル直径 12mm, 壁効果無し



(b) モデル直径 12mm, 壁効果有り



(c) モデル直径 14mm, 壁効果無し



(d) モデル直径 14mm, 壁効果有り

図-12 平均流速と注水面からの距離の関係(二次元)

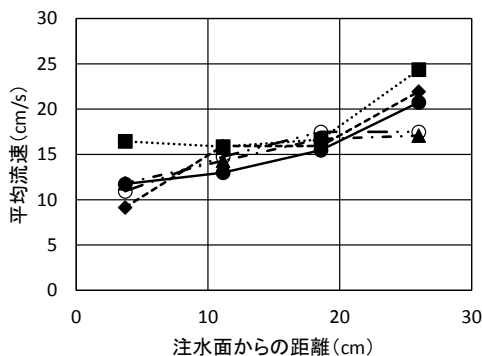


図-13 平均流速と注水面からの距離の関係(三次元)

かる。壁効果が有る場合の下部を流れる粒子6は、壁効果による間隙部を流動する。また、壁効果有りの場合は、図-9(b), (d)中に○印で示した位置で滞留が発生した。これは、既報<sup>5)</sup>においても確認されており、その原因として、図-10に示すように、空隙の大きくなることで流速のばらつきが大きくなったことの影響が考えられる。壁効果を除去した場合の粒子6は、POCモデル間の間隙を上下に移動して、滞留は発生していない。三次元解析において、上部から流れる粒子1は二次元解析と同様に自由表面付近を流動している。三次元解析では奥行があ

り、二次元解析に比べてより複雑な流動をしている。壁効果の影響については三次元解析ではまだ取り扱っていないため、今後その影響を検討する予定である。

### 3.4 流下方向における流速の分布

二次元および三次元解析において、試験体を流下方向に4等分した各区分における3つの粒子の平均流速を図-12 および図-13 に示す。測定の対象とした粒子は、3.3で軌跡を追った粒子で、二次元解析では粒子1~6、三次元解析では粒子1~5である。

図-12によれば、空隙面積率および壁効果の有無に関わらず、排出面に近づくにつれて、平均流速は速くなることわかる。壁効果の影響としては、壁効果のある場合に底部の流速が大きくなる傾向があり、特にPOCモデル直径の小さい12mmの場合にこの傾向が顕著である。上~中部の高さの流速に関しては、壁効果の有無による影響が見られないことから、壁効果の有無による流量の違いは、壁効果のある底部のみの流速に起因していることが分かる。また、流速の変化に及ぼす壁効果の影響は、空隙率が大きいほど大きくなっている。既報<sup>5)</sup>で観測された流速は、5~20cm/sの間であったが、二次元の解析結果は10~45cm/sの間で分布し、2倍程度の流速となっている。この原因として、粒子間距離と間隙距離の関係による解析誤差が挙げられる。この点については、今後検討する必要がある。

三次元解析における流速分布は、傾向として二次元解析での流速分布と同様に排出面に近づくにつれて、平均流速が大きくなっている。三次元の解析結果の妥当性については、今後、さまざまな要因と水準でシミュレーションを行い、実験による検証も行う予定である。

## 4. まとめ

本報では、MPS法を用いたPOC二次元モデルおよびPOC内部を単純化した三次元モデルの流動シミュレーションを行った。本解析では、既報の実験結果と比べて、空隙率（空隙面積率）が大きい範囲での検証となったため、定量的な比較については今後の課題となるが、定性的な傾向として、以下の知見を得た。

- (1) MPS法での二次元POCモデルにおいても、実験で生じる壁効果の影響は確認でき、壁効果の影響により水の流量および透水量の増加傾向が示された。
- (2) 既報の実験結果から得られている注水面の水位と流量の間の正比例の関係が再現された。
- (3) 流速と動水勾配の関係は、二次元および三次元の解析結果共に非線形となることが示された。

- (4) 実験結果で確認されていた、底部の壁効果による空隙の大きい箇所での水の滞留が解析的に再現された。
- (5) POC内部の水の流速のばらつきが壁効果の影響で増大する傾向が再現された。

## 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研究委員会報告書, pp.336-339, 2015.6
- 3) 越健, 古川浩司, 国枝稔, 六郷恵哲: せき板効果を取り除くことによるポーラスコンクリートの透水試験方法の改善, コンクリート工学会年次論文集, Vol.23, No.1, pp.157-162, 2001.6
- 4) 夏目実穂, 畑中重光, 三島直生: ポーラスコンクリートの透水モデルの構築に関する実験的研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1351-1356, 2015
- 5) 関本亮太, 三島直生, 畑中重光: 二次元可視化実験によるポーラスコンクリート内部の水の挙動に関する基礎研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1351-1380, 2015
- 6) 前川明弘, 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に関する実験とそのモデル化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.625, pp.363-368, 2008.3
- 7) 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水平方向透水性能に及ぼす壁効果の影響と内部の水の流速分布に関する実験的研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1743-1748, 2016
- 8) 山口柏樹: 土質力学(全改訂), 技報堂出版, pp.53-64, 1984
- 9) 松岡元: 土質力学, 森北出版, pp.32-53, 1999
- 10) 川合茂, 和田清, 神田佳一, 鈴木正人: 河川工学, コロナ社, pp.55-57, 2002