

論文 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

関本亮太*1・三島直生*2・畑中重光*3

要旨：ポーラスコンクリート舗装内部を水平方向に水が流れる場合の透水性についての研究報告例は少ない。本研究では、ポーラスコンクリート内部の自由表面を持った水平方向の透水挙動を把握すること目的としている。本報では、その基礎段階としてポーラスコンクリートの二次元可視化モデルを作成し、モデル内を流動する水の挙動、流速の分布、壁効果の影響などの傾向を把握するための実験を行った。その結果、本実験で用いた二次元可視化モデルによって、ポーラスコンクリート内部の水の挙動をある程度把握できることが示された。また、壁効果の影響により、ポーラスコンクリート内部の水の流速分布は複雑になり、型枠底部に滞留が発生することなどが確認された。

キーワード：ポーラスコンクリート、可視化、水平透水、透水挙動、壁効果

1. はじめに

ポーラスコンクリート（以下、POC と略記）は内部の連続空隙により、透・排水性、通気性、生物・植物許容性等の機能を有している。特に透・排水性に関してはPOC 内部に雨水を貯留したり、雨水の流出速度を遅延できるため、舗装上の水たまりを防ぐだけでなく、排水のスピードを調整し、排水地点での冠水リスクを低減する集中豪雨対策としての利用も提案されている¹⁾。

POC の透水性については、定水位透水試験に関して図-1 に示すような試験装置を用いた透水試験方法（案）²⁾が日本コンクリート工学会により示されており、調合条件が透水係数に及ぼす影響なども研究されている³⁾。しかし、水平方向の自由表面を持つ水の透水挙動については筆者らの研究⁴⁾を除き、極めて研究例が少ない状況である。POC によって降雨時の排水を制御することを一つの目標とするならば、飽和状態だけではなく、より現実に近い自由表面を持つ水平方向の透水挙動も把握しておく必要がある。

このため本報では、実際の POC を用いた実験に先立ち、POC を簡易な二次元モデルに置き換えて可視化し、モデル内を流動する水の流動挙動、流速の分布などの傾向を把握するための実験を行う。

2. 実験方法

2.1 既往の研究結果と本実験の目的

既報⁴⁾において検討された二次元可視化モデル実験では、本実験とはほぼ同じ装置を用いて、POC モデル内の水の流速分布等について検討した。その結果からは、二次元モデル内を透過する水の水位は注水面から排水面まで双曲線状に低下すること、底部で滞留が発生すること、排水面に近づくほど流速が上昇すること、および水の流動挙動は底面の壁効果の影響を大きく受けることなどが明らかとなった。ここで壁効

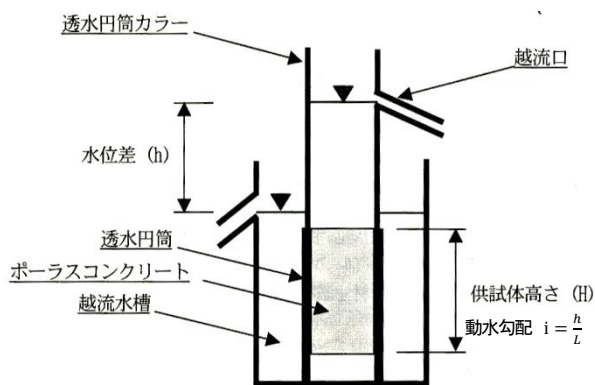


図-1 定水位透水試験装置²⁾

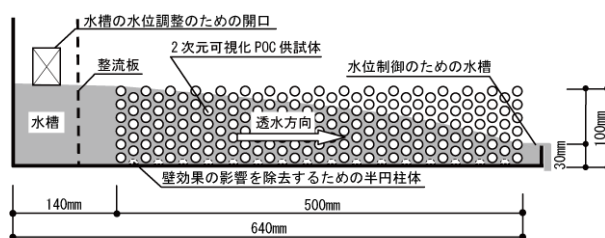


図-2 二次元可視化試験装置概要

果とは、POC を打ち込む際に型枠付近ではそれ以外の箇所と比べ、空隙率が大きくなる現象を指す。透水試験結果に及ぼす壁効果の影響に関しては、越ら⁵⁾により検討され、型枠供試体はコア供試体に比べ大きな透水係数を示すことが指摘されている。

そこで本実験では壁効果の有無が水平方向に流れる自由表面を持つ水の挙動に及ぼす影響に焦点を当て、二次元可視化実験により検証する。

2.2 実験装置

本実験で使用した試験装置の概要を図-2 に示す。POC モ

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 (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・工博 (正会員)

*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授・工博 (正会員)

デル部分は、長さ 30mm の $\Phi 16$ mm プラスチック製円柱体を、POC のセメントペーストと粗骨材に当たる固相と考え、円柱体の中心間の距離を 17.6mm として斜方格子状に整列配置した。その結果、二次元 POC モデルの断面積に対する空隙の断面積の比率から求めた空隙面積率は約 25% となった。

注水方法としては、二次元 POC モデルの左側側面を注水面側とし、水位を一定に保つことのできる水槽を設け、ホースで注水し続けることで一定の水位を保持した。ホースの水流の影響を除外するために、二次元 POC モデルと水槽の間に整流板を設けた。また、既報⁴⁾では、排水面は水位を制御することなく高さを 0 とし、そのまま排水していたが、注水面と排水面の水位差を明確にするために、本実験では排水面にも水槽を設け、排水高さを制御している。

写真-1 に二次元可視化モデルの底部の様子を示す。壁効果なしの測定を行う際には写真-1 (b) のように二次元 POC モデルと同様のプラスチック製円柱体を半分に割った半円柱体を底部に差し込み、壁効果の影響を除去した。その際の空隙面積率は約 23% となった。

2.3 実験方法

写真-2 に、実験状況の例を示す。小型ポンプにより注水面の水位を 100mm で一定に保ったまま、二次元 POC モデル内の水流が平衡に達した後に、直径約 1mm の赤色に着色したゲル状粒子をマーカとして、整流板右側から投入し、二次元 POC モデル内部を通過させ、その様子をデジタルビデオカメラで撮影した。

マーカの投入位置は、図-2 に示した二次元 POC モデル供試体の左端部とし、図-3 に示す①～⑥とした。マーカは各投入位置から 3 回ずつ流した。マーカは、コンクリート用増粘剤水溶液に水酸化ナトリウムを添加したゲル状物質に赤色ポスターカラーで着色して作製した。またマーカの密度は水とほぼ同じとなるようにした。撮影したビデオ画像より、マーカの軌跡および移動速度を測定し、二次元 POC モデル内部の水流の流速分布を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 透水係数

自由表面を持つ水平方向の水流に対して、層流と仮定して水位差と流量の関係を求めるデュピュイの式(1)⁶⁾を用いて水平方向透水係数を算出した。排水面で測定した流量および透水係数を表-1 に示す。

$$Q = \frac{kB}{2L} (H_1^2 - H_2^2) \quad (1)$$

ここで Q : 流量(cm^3/s)

k : 透水係数(cm/s)

B : 供試体幅(cm)

L : 供試体長さ(cm)

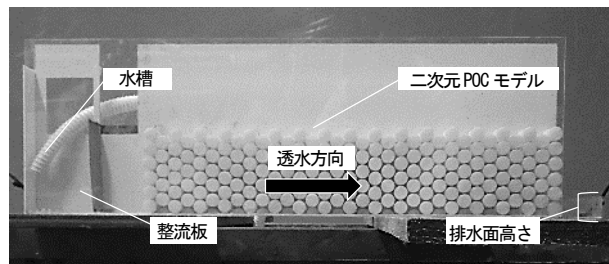
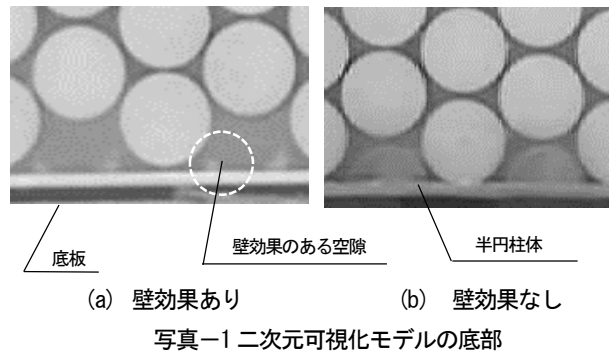


写真-2 二次元可視化実験の様子

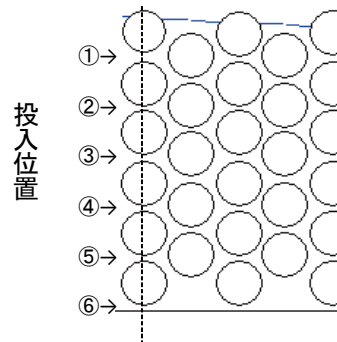


図-3 マーカの投入位置

表-1 流量と透水係数

	流量 (cm^3/s)	透水係数 (cm/s)	空隙率 (%)
壁効果あり	35.2	12.9	25
壁効果なし	29.3	10.7	23

H_1, H_2 : POC を透過する水の水位(cm)

$(H_1^2 - H_2^2)$: 計算区間中の POC の水頭差

壁効果ありの方が壁効果なしに比べ流量・透水係数ともに大きい結果となった。空隙率による違いもあるが、これにより、二次元可視化モデルにおいても壁効果の影響により、底部付近の流量が増加し、大きな透水係数を示すことが確認された。

なお、文献⁷⁾を参考に JCI の透水試験方法による透水係数の値を算出したところ、おおよそ $2.1\text{cm}/\text{s}$ であった(ここで粗骨材粒径は 15.3mm 、セメントペーストの膜厚を 0.35mm すなわち直径は 16.0mm とした)⁸⁾。すなわち、既報りと同様に、自由表面を有する水平方向の透水試験より得られる透水係数の値の方が、かなり大きくなるのが分かる。

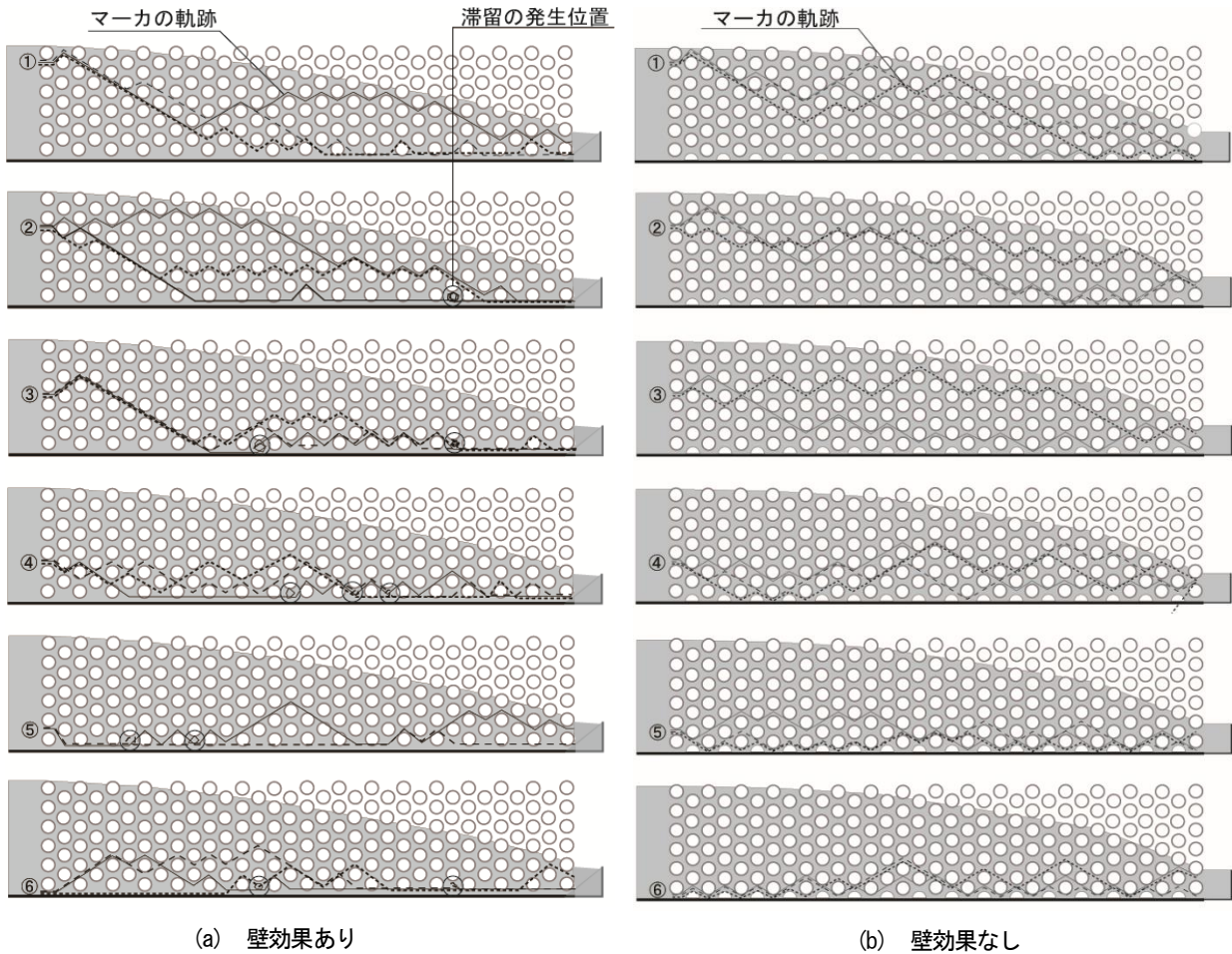


図-4 マーカの軌跡

3.2 マーカの軌跡の測定結果

図-4 にマーカの軌跡の測定結果を各投入位置ごとに示す。図-4 (a), (b)によれば、投入位置①, ②の上部よりマーカを投入した場合でも、水流の上部（自由表面）にそって流動するわけではなく、不規則に間隙中を上下に移動して流動しているのがわかる。壁効果ありの場合、途中まではマーカがスムーズに間隙を通過しているが、図-4 (a)中に○印で示した位置で滞留が発生した。これは底部には、壁効果により局所的に空隙が大きくなる部分が存在している影響と考えられる。底部以外での滞留の発生は確認されなかった。また、壁効果ありにおいて、マーカが底部に達した場合には、そのまま一直線に排出面まで流動するものも見られた。壁効果ありでは底部に達したマーカのほとんどがそのまま底部を通過していたが、図-4 (b)に示した壁効果なしの場合は底部に達した後、再浮上するという動きも数箇所を確認できた。

図-5 に、図-4 中の A の領域に生じたマーカの滞留の様子を示す。図中に示した●は1秒ごとのマーカの位置をプロットしたものである。発生箇所により大きな円を描くものや、その場で回転するものなどが見られた。

3.3 流速の分布

図-6 にマーカの投入高さ（投入位置）と平均流速の関係を示す。平均

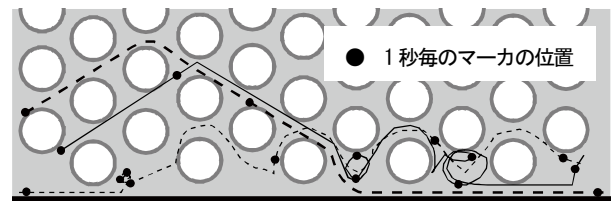


図-5 マーカの滞留の様子（図-4 (a)中の A の例）

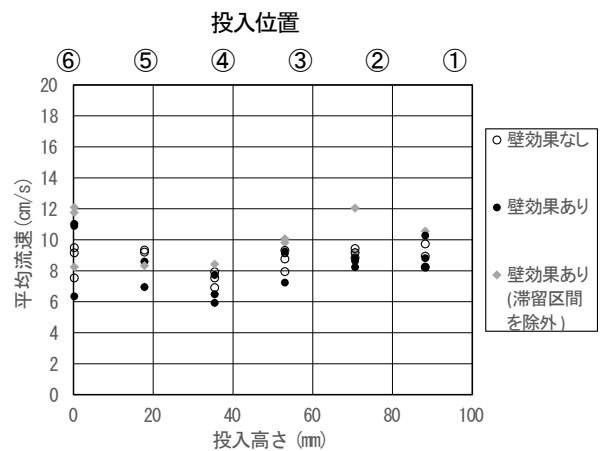


図-6 マーカの投入高さ（投入位置）と平均流速の関係

流速は、モデルの長さを4等分した区間（12.5cm）ごとに、マーカを投入してから二次元 POC モデルから排出されるまでの時間を計り、マーカの流動距離を除いて求めた。ここで

流動距離は、マークは空隙の中心を通るものと仮定し、全投入高さでマークが移動した距離、曲がった回数を平均して算出した。

壁効果ありの場合、底部で滞留が発生しており、滞留の発生状況により、平均流速のばらつきが大きくなった。滞留が発生した試験結果にどのような影響を与えるか不明な点があるため、ここでは、壁効果ありの場合において、滞留が発生したものについては、滞留の影響を除いた区間での平均流速を測定し、「壁効果あり（滞留区間を除外）」として各図中に表示した。

上部に投入した場合にもマークは不規則に移動し、途中から底部付近を流動しているものもあるため、正確な評価とは言い難いものの、壁効果ありの底部以外は投入位置によらず概ね一定の平均流速となっていると評価できる。また、滞留区間を除いた結果を見ると壁効果の影響により平均流速が速くなるのが確認できる。

図-7に、注水面からの距離と流速の関係を示す。同図(a)~(c)より、壁効果の有無に関わらず、排出面に近づくにつれ、流速が速くなっているのが分かる。この結果として水平方向透水試験では、注水面からの距離が遠くなるにつれて、水位が下がり、流動面積が狭くなる。

図-7(a)に示した壁効果ありの投入位置6のマークに着目すると、両端部付近での流速は他に比べ高い結果となった。これは壁効果の影響であると考えられる。また、図-6(a), (b)で、壁効果のありとなしを比較すると、壁効果ありは流速のばらつきが目立つ。これは底部の滞留に影響していると考えられる。

図-7(c)に示す壁効果ありで滞留を除いた結果を見ると、投入位置⑥を除いて図-6(a)よりばらつきが少なくなった。このことから滞留により流速の測定結果が不規則になっていると考えられる。また、マークの軌道によりモデル底部を流動する時間が異なること、壁効果の影響範囲が異なることなどのため、誤差が生まれると考えられる。

図-7中には、各位置の水位から空隙率を考慮した水の流動断面積を求め、流量を除すことにより求めた流速の計算値も併示してある。ここで、計算値は以下の式を用いて算出した。

$$V = Q / (HBx) \quad (2)$$

ここで V : 流速(cm/s)

Q : 流量(cm³/s)

H : 水面の高さ(cm)

B : 供試体幅(cm)

x : 空隙率(%)

マークの流速の実測値を計算値と比較すると、壁効果の有無に関わらず、平均的に実測値は計算値よりも若干大きな値を示した。この理由として、実測値を測定する際に、流速の

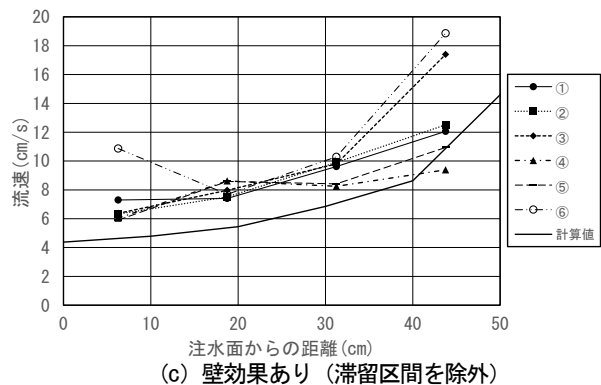
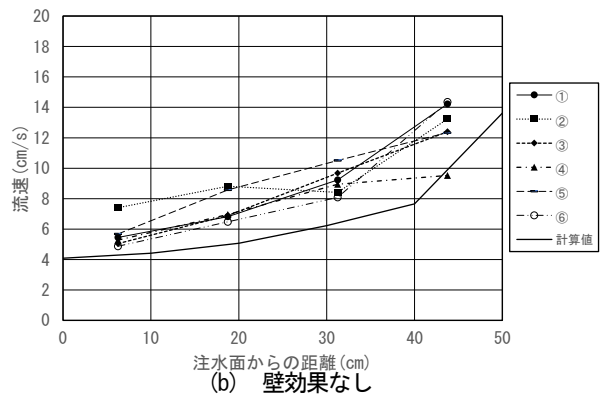
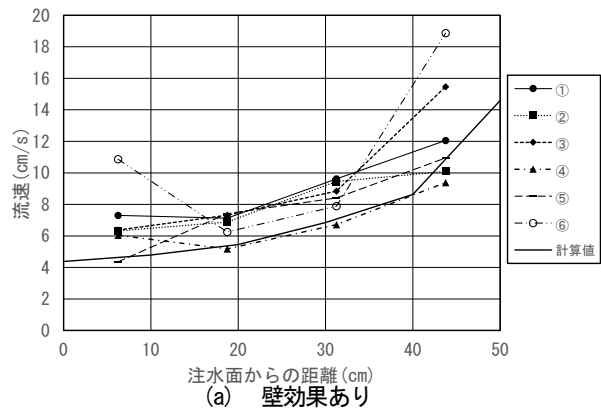


図-7 注水面からの距離と流速の関係

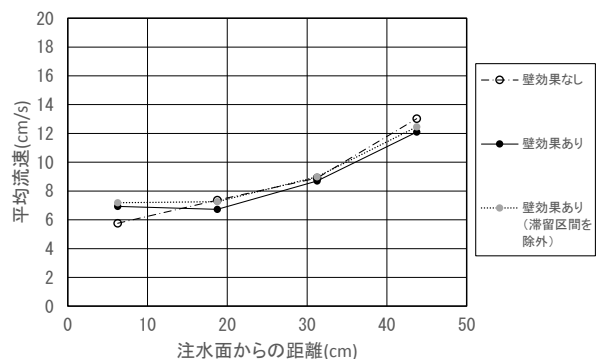
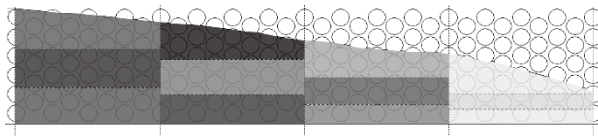


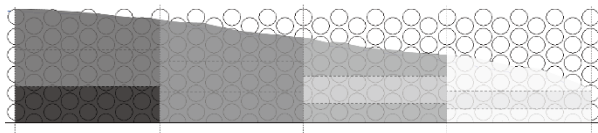
図-8 各条件における注水面からの距離と平均流速の関係

分布は、骨材表面では遅く、骨材間では速くなっていること、マークは骨材間を移動しているが、流速の速い骨材間の中心部を多く通過していると考えられ、断面の流速を平均して算

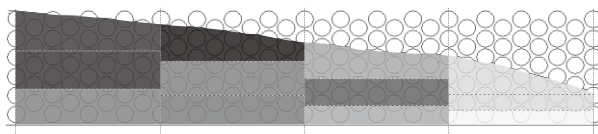
流速(cm/s)							
~6.0	6.0 ~7.0	7.0 ~8.0	8.0 ~9.0	9.0 ~10.0	10.0 ~11.0	11.0 ~12.0	12.0~



(a) 壁効果あり



(b) 壁効果なし



(c) 壁効果あり(滞留区間を除外)

図-9 流速の分布

出している式(2)と比較すると、計算値に比べ実測値が大きく評価されていること、などが考えられる。

図-8に、各条件における透過距離とモデルを長さ方向に4分割して算出した流速の全投入高さでの平均の値との関係を示す。図によれば平均値を用いることで壁効果の影響はほとんど見られなくなっている。なお、壁効果なしに比べ壁効果ありの値が若干低い結果が、滞留区間の影響を除くとほぼ同等な値まで平均流速が上昇する結果となった。

図-9に、二次元の流速分布を示す。これは試験体を長さ方向に4等分、高さ方向に3等分して、その領域をマークが流れる時間を測定して流速を算出したものである。

図-9(a)に示す壁効果ありの測定結果はばらつきが多く、あまり規則性は見られないが、排出面に近づくにつれ流速が速くなっているのは図-6と同様な傾向が確認できた。部分的に底部の流速が遅くなっているのは、滞留の影響であると考えられる。

図-9(b)に示す壁効果なしの場合も排出面に近づくにつれ流速が速くなったが、壁効果ありの場合とは異なり高さ方向にはほぼ同等の流速になるという結果になっている。

図-9(c)は、滞留区間を除いた場合の流速分布を示したものである。図によれば、図-8(a)の結果と比べて、底部の流速が主に左半分で増加しているのが確認できる。このことから、滞留を除けば壁効果により型枠付近の流速が上がるという現象が生じているといえる。

以上より、壁効果ありで不規則であった水の流動は、壁効果なしでは、比較的規則的になる。すなわち壁効果により、流速の分布が変化するなど、水の挙動を複雑にしていると考えられる。

4. まとめ

本実験では、円柱形骨材を用いた骨材整列配置の条件の二次元可視化モデルによって、POC内部を水平に流れる水の挙動に関して、以下の知見を得た。

- 1) 本研究で用いた二次元可視化モデルにより、ポーラスコンクリート内部の水の流動挙動が擬似的に再現されたと考えられる。また一般的な傾向として二次元可視化モデル内を流動する水の流速は、排水面に近くなるほど上昇することが確認できた。
- 2) 使用した二次元可視化モデルにおいても型枠境界(底部)の壁効果は確認され、壁効果により水の流量および透水係数が増大する。
- 3) 二次元可視化モデル底部の壁効果により、空隙が大きくなっている箇所では滞留が発生することが多い。
- 4) 二次元可視化モデル底部の壁効果の影響により、水の流動挙動が複雑になる。

以上の結論は、二次元可視化モデルにおけるものであり、実際のPOCでは異っている可能性がある。今後、実際のPOCでの実験を行い、検証を行う必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、原田守博先生(名城大学教授)のご助力を得た。また本研究費の一部は、みえ防災・減災センター研究費によった。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 畑中重光, 酒井俊典, 中川武志, 三島直生: 都市水害の減災に資する地盤内の水流制御技術の開発研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 205-206, 2013
- 2) コンクリート工学協会: ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書, pp. 182-187, 2003.5
- 3) 石黒哲, 湯浅幸久, 畑中重光: ポーラスコンクリートの物理的性質に及ぼす各種要因の影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp. 73-76, 2000.2
- 4) 河合純: ポーラスコンクリート舗装内の水平方向透水挙動に関する実験的研究, 三重大学修士論文, pp. 22-28, 2012.3
- 5) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23., No. 1., pp. 157-162, 2001.7
- 6) 武政剛弘, 古本勝弘, 藤川佳彦, 河野健一: 自由地下水層内の透水係数に関する一考察, 長崎大学工学部研究報告, Vol. 14., No. 23., pp. 179-188, 1984.7
- 7) 夏目実穂, 畑中重光, 三島直生: ポーラスコンクリー

トの透水係数に関する一考察, 日本建築学会東海支部
研究報告書, 第53号, pp. 17-20, 2015. 2

8) 内田寿久, 畑中重光, 三島直生: 塩化カルシウム水溶

液によるポーラスコンクリートおよびその結合材の劣
化に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集,
Vol. 79, No. 697, pp341-347, 2014. 3