

論文 ポーラスコンクリートの非線形透水挙動に及ぼす壁効果の影響とその推定に関する研究

松岡 卓^{*1}・関本 亮太^{*1}・三島 直生^{*2}・畑中 重光^{*3}

要旨：本報では、ポーラスコンクリートの壁効果が透水挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした鉛直方向透水実験を行った。5, 6, 7号砕石を用いたポーラスコンクリートに対し、壁効果の有無、空隙率、水位差を要因とした透水試験を行った。その結果から、流速と動水勾配の関係を累乗関数で近似できることを確認し、壁効果の影響による流速の変化を定量的に提示した。次に、単純格子モデルから壁効果による空隙率の分布を求め、壁効果有りの場合の流速の推定を試みた。その結果、5号砕石を用いた場合以外の推定は、できないことが確認された。

キーワード：ポーラスコンクリート、壁効果、透水係数、透水試験、動水勾配、流量

1. はじめに

ポーラスコンクリート（以下、POCと略記）は、内包する連続空隙を持つことから、透水性能・吸音性能等を有する環境共生型コンクリートとして、多岐に渡り用いられてきた。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の機能から、近年増加する集中豪雨等による洪水被害の対策としての活用が期待されている。また、POC舗装は雨水が表層から地盤に浸透していくことで、地下水の確保にもつながると考えられている。

POC舗装を設計するためには、POC舗装内部の水の流動挙動を把握する必要がある。これまでに、POCの透水係数の測定方法としては、日本コンクリート工学会により定水位透水試験方法（案）¹⁾が示され、一般的に用いられている。同試験方法では、式(1)のダルシー則が成立すると仮定して（すなわち、流速と動水勾配の関係は線形と仮定して）透水係数を算出している。一方で、流速と動水勾配の関係は、ある範囲において式(2)²⁾および式(3)^{3,4)}のように非線形関係が成立するという報告もある。

$$v = k_T \times i \quad (1)$$

$$i = av + bv^2 \quad (2)$$

$$v = k' \cdot i^m \quad (3)$$

ここに、 k_T ：透水係数(cm/s)、 v ：流速(cm/s)、 i ：動水勾配、 a および b ：骨材粒径や空隙率で表される係数、 k' および m ：非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数

図-1に式(1)から(3)の概念図を示す。浅野ら²⁾によれば動水勾配が0.17～1.26の範囲で行った実験の結果、供試体中の流れは概ね乱流状態であり、式(2)に示すように流速と動水勾配の間の関係は線形ではないことが示され

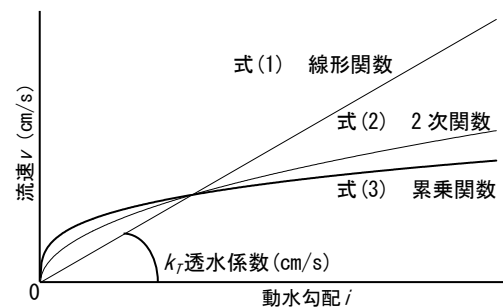


図-1 式の概念図

ている。また夏目ら^{6), 7)}の実験結果から流速と動水勾配の関係は線形ではなく、式(3)に示すように累乗関数で近似されることを確認し、決定される非線形透水挙動の近似係数による評価が提唱されている。しかし、式(3)のような非線形の透水挙動を取り扱った研究は少なく、検証を進める必要がある。

また一方で、POCは、型枠に接する部分とそれ以外の部分では、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。壁効果の影響を受ける部分は、空隙が大きくなり、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という報告がある^{5), 6)}。

しかし、現時点ではこの壁効果の影響により、流速や透水係数といった流動特性がどの程度変化するのは定量的に把握されていない。このため本報では、POCの非線形の透水挙動に壁効果が与える影響を明らかにすることを目的とした実験的検討を行う。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

表-1に、本実験の要因と水準を示す。本研究の目的

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生（正会員）

*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）

である壁効果の有無を実験の主要因とし、粗骨材粒径および設計空隙率はそれぞれ3水準とし、基本水準は粗骨材粒径が6号、設計空隙率が25%とした（ここで、各設計空隙率に対する実測空隙率の誤差は、最大で±5.12%であった）。実験にはφ100×200mmの円柱供試体を使用し、水位差は20, 10, 5, 1cmの4水準とした。これにより、動水勾配の測定範囲は0.05～1となった。

2.2 使用材料および調査

表-2に、POCに用いた材料の特性を、表-3にPOCの調査表を示す。粗骨材には5, 6, 7号の碎石を用いた。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比は0.35で一定とした。セメントペーストが目標フローとなるように適宜混和剤を添加した。

2.3 供試体の作製方法

φ100×200mm 円柱供試体を各水準3本ずつ作成した。POCの練混ぜには、一軸強制パン型ミキサ（容量100L）を使用し、ペースト先練り方法を採用した。練混ぜ手順は、初めにセメントと水および混和剤をミキサで60秒間練り混ぜ、次に粗骨材を投入し、粗骨材とセメントペーストの状態を見ながら練混ぜを続け、十分に練り混ぜたことを確認した後に円柱型枠に2層に分けて打ち込んだ。打込みは、各層を付き棒で突き固め、型枠の上面に天端がそろそろよう、コテで仕上げた。型枠に充填されるPOCの設計質量を事前に調査表より算出し、POCの質量を測りながら打ち込むことで、設計空隙率に近い供試体を作製した。供試体作製時の質量の許容差は5%とした。

2.4 透水試験方法

透水試験方法は、日本コンクリート工学会による透水試験方法（案）¹⁾に準じて行った。試験装置に関しては、日本コンクリート工学会により提案されている試験装置¹⁾を参考にし、図-2に示すように透水円筒カラーを作製した。水位差は透水円筒カラーに接続されたホースの先端の高さを変えることで対応した。壁効果の比較方法は、壁効果有りの場合、供試体の直径と等しい内径の透水円筒カラーにはめてそのまま測定した。壁効果無しの場合、壁効果有りの場合と同一の供試体を用いて、供試体側面に2mm厚のポリエチレンシートを二重に巻きつけて、供試体よりも大きい内径の透水円筒カラーにはめた状態で鋼製バンドで締め付けて試験を行った。また、供試体が入る透水円筒カラー部分と上部は継手で接合し、供試体の交換が容易にできるようにした。測定は、水位差が大きい20cmから行い、10cm, 5cm, 1cmの順で測定した。水槽からの越流量を30秒間測定した。各水準3回ずつ測定を行い、結果を平均して用いた。ただし、粗骨材粒径6号、設計空隙率35%、壁効果有り、水位差20cmの場合においては越流量が多いため測定時間は15秒間とした。

表-1 要因と水準

要因	水準
粗骨材粒径	5号 (20~13mm) 6号 (13~5mm) 7号 (5~2.5mm)
設計空隙率(%)	15, 25, 35
水位差(mm)	1, 5, 10, 20
壁効果 ^{*1}	有, 無

— : 基準となる水準

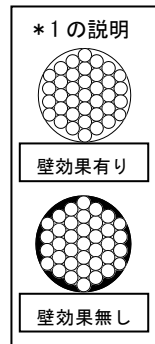


表-2 POCの使用材料

使用材料	種類・特性値	記号
セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15g/cm³	C
水	上水道水	W
混和剤	ポリカルボン酸系 高性能 AE 減水剤	HAE
	セルロース系 増粘剤	HEC
粗骨材	単粒度碎石 5号 実積率: 58.6% 密度: 2.71g/cm³ 単粒度碎石 6号 実積率: 58.1% 密度: 2.73g/cm³ 単粒度碎石 7号 実積率: 55.3% 密度: 2.71g/cm³	G

表-3 POCの調査表

W/C	砕石の種類	設計空隙率(%)	単位量(kg/m³)			HAE/C(%)	HEC/C(%)	目標フロー値(mm)
			W	C	G			
0.35	5号	25	86.1	246	1556	—	0.04	150
	6号	15	141.1	403	1554	—	0.03	160
		25	88.6	253	1554	—	0.02	170
		35	36.1	103	1554	—	0.01	180
	7号	25	103.3	295	1469	0.15	—	215

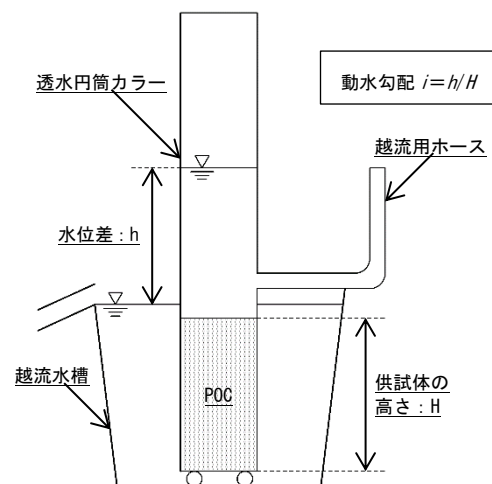


図-2 透水試験装置

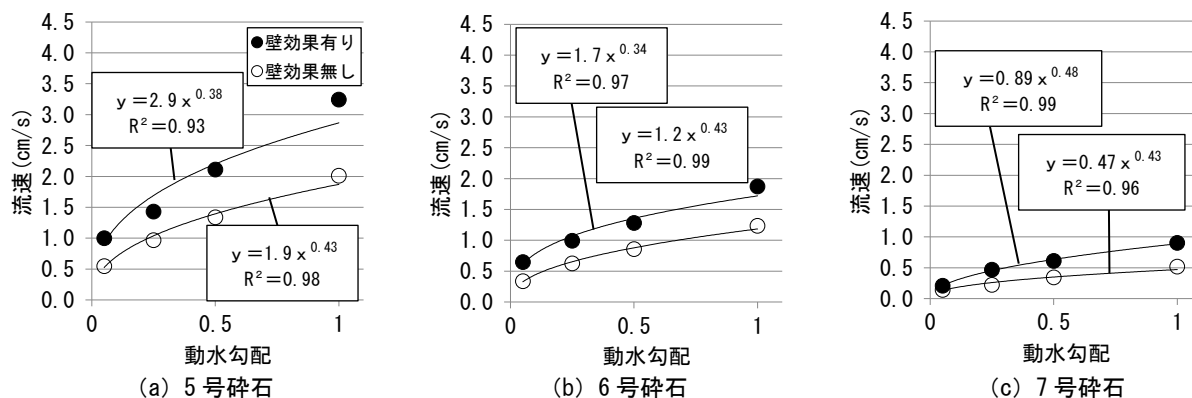


図-3 設計空隙率 25%における流速と動水勾配の関係

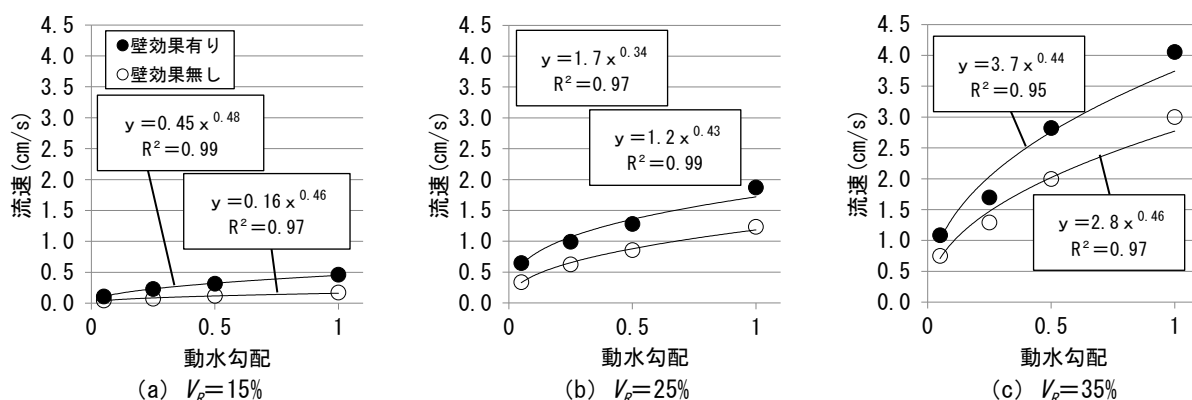


図-4 6号碎石を用いた場合の流速と動水勾配の関係

3. 実験結果および考察

3.1 流速と動水勾配の関係

(1) 粗骨材粒径および空隙率の影響

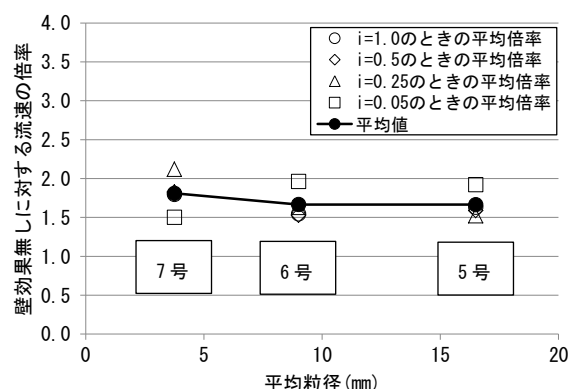
図-3に、設計空隙率が25%における粗骨材粒径ごとの測定結果から算出した流速と動水勾配の関係を、図-4に、6号碎石を用いた場合の、空隙率が流速と動水勾配の关系到及ぼす影響を示す。同図には、壁効果の有無それぞれに式(3)で最小二乗法により近似した曲線も併示する。粗骨材粒径が大きくなるほど、また、空隙率が大きくなるほど流速が大きくなる傾向がある。また、壁効果無しの場合よりも壁効果有りの方が流速が1.5倍程度大きくなっている。また、式(3)に示す非線形関数で精度良く近似できている。

(2) 壁効果無しに対する壁効果有りの流速の倍率

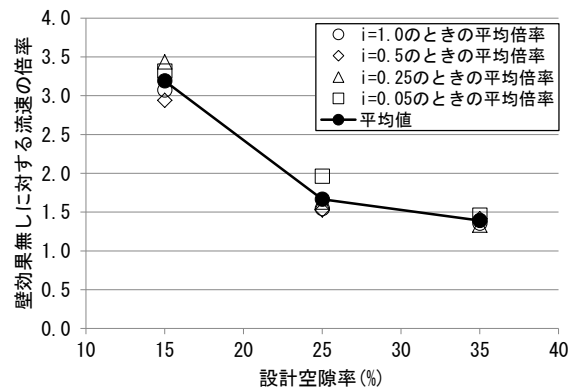
図-5に、壁効果無しに対する壁効果有りの流速の倍率を示す。ここで、同倍率は各動水勾配時点の実測値から得られた両者の流速の比として求めた。図-5(a)によれば、粗骨材粒径によらず、流速の倍率は1.5~2.0倍程度であった。一方、図-5(b)によれば、設計空隙率15%の場合のみ倍率が大きくなる傾向がある。以上の結果からは、POC内部の流速が遅い場合に、壁効果の影響が相対的に大きくなると考えられる。

3.2 累乗指数 m と粗骨材粒径および空隙率の関係

図-6に、式(3)の累乗指数 m と粗骨材粒径および空隙



(a) 粗骨材粒径の影響 ($V_R = 25\%$)



(b) 設計空隙率の影響 (6号碎石)

図-5 壁効果無しに対する壁効果有りの流速の倍率

率の関係を示す。 m に対しては、空隙率、骨材粒径および壁効果の影響は見られず、値は概ね0.3~0.6の間に分

布していることが分かる。

3.3 係数 k' と粗骨材粒径および空隙率の関係

図-7には、式(3)の k' と粗骨材粒径および実測の空隙率の関係を示す。 m には図-6の値を用いた。図-7から、粗骨材粒径が大きくなるほど、また、空隙率が大きくなるほど k' の値が大きくなる傾向があり、両者の関係はほぼ線形の関係となっている。同図中には、壁効果無しの場合の近似曲線を示した。壁効果の影響に関しては、流速の場合と同様に全ての供試体で壁効果無しよりも有りの方が k' が大きくなっている。

累乗指数 m の値に粗骨材粒径、空隙率および壁効果による影響が見られないことから、以降の考察ではモデルをより簡単にするために平均値 $m=0.44$ で固定した〔式(3)'参照〕。

$$v = k'' \cdot i^{0.44} \quad (3)'$$

ここに、 k'' : $m=0.44$ とした時の非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数(ただし、 $k'' \geq 0$)

図-8に、式(3)'を用いて、基本水準を再度測定結果から最小二乗法で近似した時の k'' と粗骨材粒径および空隙率の関係を示す。同図中には、壁効果無しの場合の近似曲線を示した。図-7と同様の結果となっている。

ここで、 m の値は実際には何らかの要因で変動する可能性もあり、また、 m の値が本実験で得られた m の範囲である 0.3~0.6 に変動した場合には、6号砕石を用いた設計空隙率 25% で壁効果無しの場合の POC の $i=0.5$ のときの流速は平均で約 81% (0.80~0.98 cm/s) 変動する。

4. 格子モデルを用いた壁効果による空隙率の影響評価

本報では、POC の内部構造を単純化し、面心立方格子を仮定して壁効果による空隙率の分布を求めた。図-9

(a) 面心立方格子を、図-9(b) に壁効果無しの場合、図-9(c) に壁効果有りのモデルをそれぞれ示す。この面心立方格子モデルから求められた空隙率は壁効果無しが 26%、壁効果有りが 47% となった。このモデルでは壁効果有りの方が約 1.8 倍、空隙率が高い。

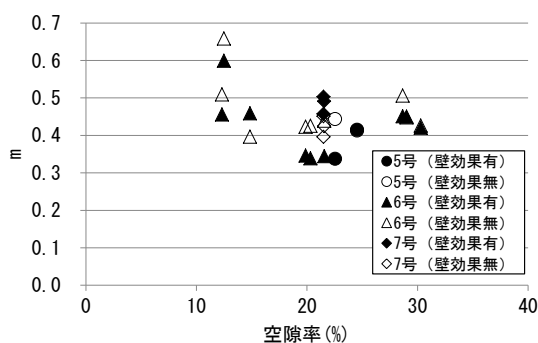
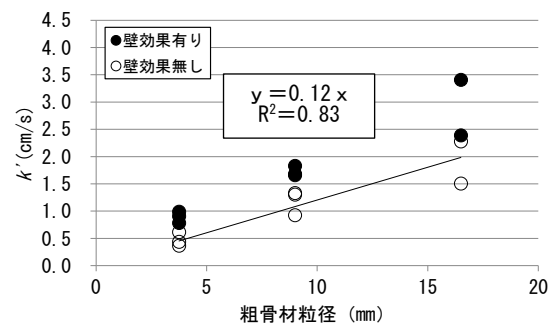
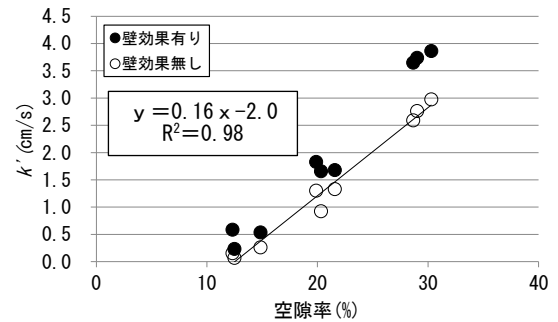


図-6 累乗指数 m と空隙率の関係

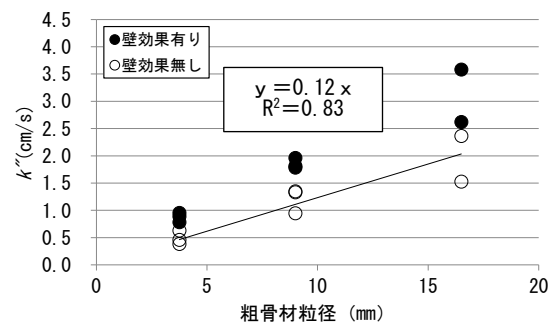


(a) 粗骨材粒径の関係 ($V_R=25\%$)

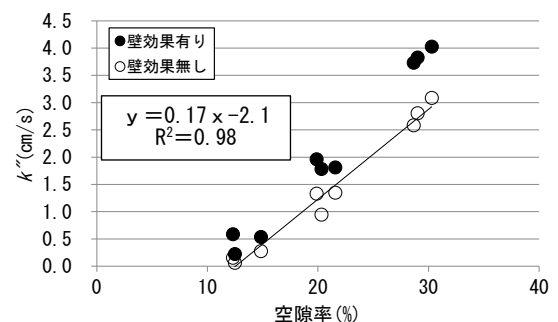


(b) 空隙率の関係 (6号砕石)

図-7 係数 k' (指数 m が図-6 の値の場合)

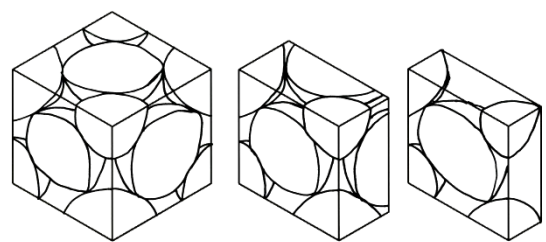


(a) 粗骨材粒径の関係 ($V_R=25\%$)



(b) 空隙率の関係 (6号砕石)

図-8 係数 k'' (指数 $m=0.44$ に固定した場合)



(a) 面心立方格子 (b) 内部モデル (c) 表層モデル

図-9 格子モデルの概要

5. 壁効果による流速の推定

5.1 壁効果による流速分布

4. で記した空隙率の分布に基づき、POC 内の流速の分布の推定を試みる。以下に流速分布の算定手順を示す。

- 1) 単純モデルから求めた空隙率の比で、内部と表層の

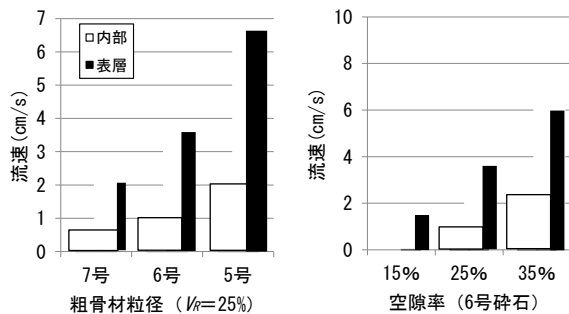


図-10 壁効果による流速分布

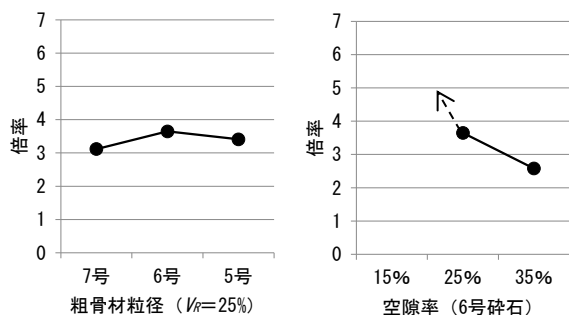


図-11 内部と表層の流速の倍率

面積比からそれぞれの空隙率を求める（なお、壁効果の範囲は平均粒径の半分とした）。

- 2) 図-8 (b) に示す線形近似式より、空隙率から透水係数を求める。ただし、6号碎石の線形近似式であるため5, 7号碎石については、図-8 (a) の線形近似式による比により、透水係数を求める。

- 3) 式(3)'を用いて、2)の透水係数から内部と表層の流速を求める。

図-10 に壁効果を考慮した計算から得られる流速分布を示す。各棒グラフの幅はφ100mmの供試体断面における面積比を示す。図から粗骨材粒径および空隙率が大きくなるにつれて、流速が増大することがわかる。

図-11 に、内部と表層の流速の倍率を示す。内部に対する表層の流速の倍率は、6号碎石で空隙率15%のもの以外は約3倍であるが、6号碎石で空隙率15%のものは内部の流速は0のため倍率は載せていない。空隙率が小さくなると内部で透水しなくなるため、倍率は極めて大きくなる。

5.2 流速と動水勾配の関係の推定値と実測値の比較

5.1 で求めた内部と表層の流速分布を用い、壁効果の影響を考慮した流速と動水勾配の関係の推定値を図-12, 図-13 に示す。図-12 に、空隙率25%における粗骨材粒径ごとの推定値を、図-13 に、6号碎石を用いた場合の、空隙率ごとの推定値を示す。比較のために壁効果有

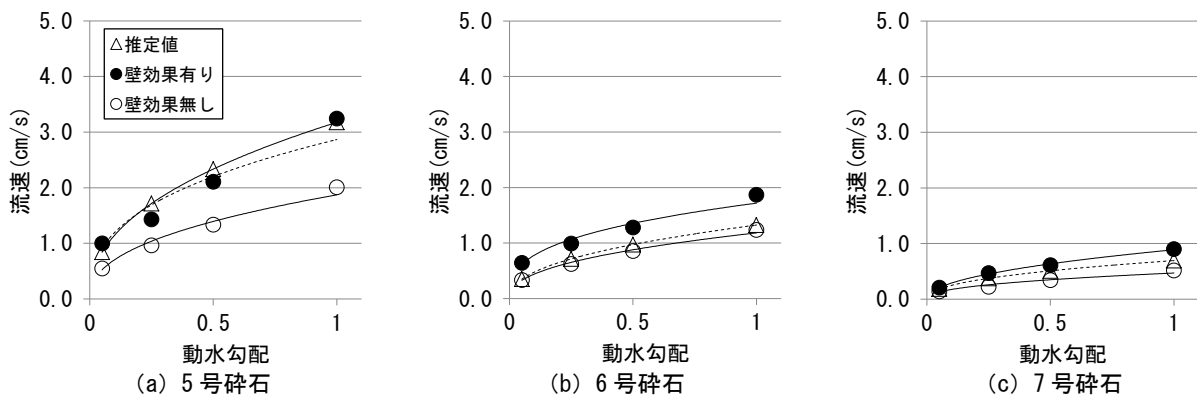


図-12 空隙率25%における流速と動水勾配の関係の推定値と実測値の比較

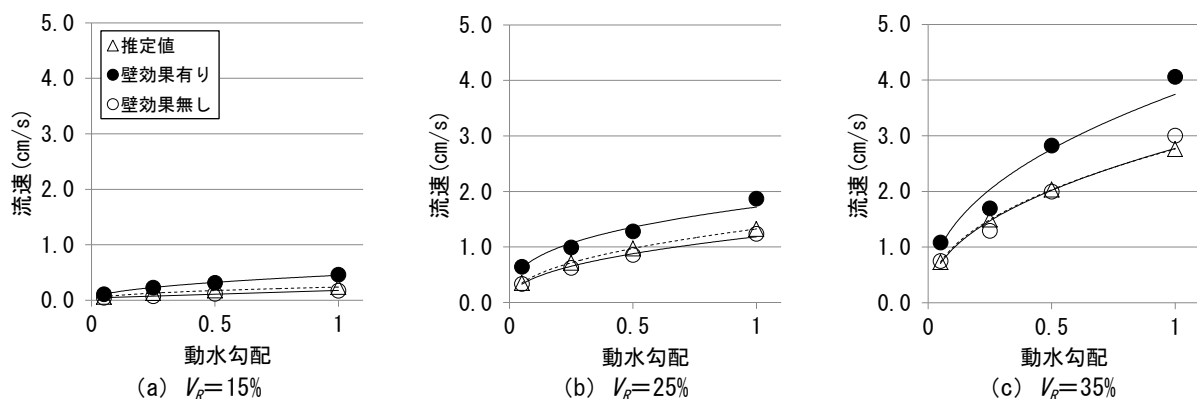


図-13 6号碎石を用いた場合の流速と動水勾配の関係の推定値と実測値の比較

りと壁効果無しの実測値も併示する。なお、累乗指数 m には 0.44 を用いた。図-12 (a) に示す、5 号砕石以外は推定値が大きく外れたが、5 号砕石では推定値は実測値に近い値となっている。5 号砕石以外で推定値が小さくなっている原因としては、壁効果の影響を過小評価していること、供試体の表面は直線的であるため、とくに透水が起こりやすく、推定より流速が大きくなっていること、などが考えられ、今後、さらに検討する必要がある。

6. まとめ

本研究では、POC の非線形の透水挙動に与える壁効果の影響に関して、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用いて実験的な検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 流速と動水勾配の関係は累乗関数で近似することが可能である。
- 2) 透水試験時の流速について、壁効果の有る場合には壁効果を除去した場合と比べて、平均 1.5~2.0 倍程度となり、POC の種類によってはさらに大きな倍率となる場合がある。
- 3) 非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数 k' 、 k'' の値は、粗骨材粒径および空隙率とほぼ線形の関係があることを確認した。

謝辞

本研究の一部は共同研究（株式会社アムラックス）に

よった。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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集，日本コンクリート工学会，pp.336-339，2015.6
- 2) 浅野勇，林田洋一，増川晋，田頭秀和：ポーラスコンクリートを通ずる流れの流速と動水勾配の関係，農工研技報，pp.227-241，2009
- 3) 石田哲朗：エクセル土質試験入門，インデックス出版，pp.85-100，2007
- 4) 今本博健，板倉忠興，高木不折：水理学の基礎，土木学会編「新体系土木工学」21 巻，技報堂，pp.140-141，1982
- 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
- 6) 夏目美穂，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，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1375-1380，2015
- 7) 夏目美穂，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