

# 論文 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

夏目 実穂\*1・三島 直生\*2・畑中 重光\*3

**要旨:** ポーラスコンクリートの透水係数の測定方法としては、コンクリート工学会より定水位透水試験方法の案が示されているが、その測定条件が測定結果に及ぼす影響に関しては必ずしも十分な検討がなされているとはいえない。本報では、透水試験結果に及ぼす測定条件の影響を明らかにすることを目的として、5, 6, 7号砕石を用いたポーラスコンクリートに対して、供試体の壁効果、水位差、および試験体長さを要因とした実験を行った。その結果、流速と動水勾配の関係は線形ではなく、累乗関数で近似されることを確認し、その際に決定される非線形の透水係数を、空隙率および粗骨材粒径によって推定できる式を提案した。

**キーワード:** ポーラスコンクリート, 流速, 動水勾配, 透水係数

## 1. はじめに

ポーラスコンクリート（以下、POCと略記）は、内部に連続空隙をもつことから、透水性能・吸音性能を有する環境共生型コンクリートとして広く用いられてきた。特に、透水性能を活用した排水性・透水性・保水性舗装は、降雨量および集中豪雨の増加に伴い、都市部の水害が増加する懸念に対して有効な対策として期待されている。また、POC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 舗装を用いて街区表面から雨水による水溜りを消失させ、かつ街区から雨水の流出を抑制するためには、まず POC 舗装内部の水の流動挙動を把握することが求められる。これまでに POC の透水係数の測定方法としては、コンクリート工学会（以下、JCIと略記）により土質試験を準用した定水位透水試験方法（案）<sup>1)</sup>が示されており、一般的に用いられている。

同試験方法では、動水勾配の範囲として 0.3 以下を推奨し、この範囲では式 (1) のダルシー則が成立するとして（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。しかし、流速と動水勾配の関係は、ある範囲において式 (2)<sup>2)</sup>および式 (3)<sup>3, 4)</sup>のように非線形関係となるという報告も存在する。ここで本報では、式 (1) の線形関係によるものを単に「透水係数」と称する。

$$v = k_T \times i \tag{1}$$

$$i = av + bv^2 \tag{2}$$

$$v = k' \cdot i^m \tag{3}$$

ここに、 $i$ : 動水勾配{水位差(cm)}/{供試体長さ(cm)},  $v$ : 流速(cm/s),  $k_T$ : 透水係数(cm/s),  $a$ 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

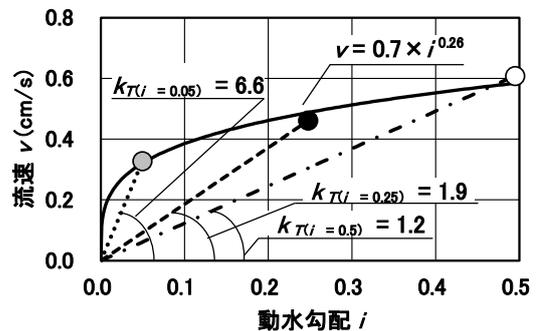


図-1 流速と動水勾配の関係の測定結果の例

図-1に式 (1) および (3) の概念図を示す。図-1は、線形ダルシー則である式 (1) で近似した結果（破線）と累乗関数の式 (3) で表示した結果（実線）を比較したものである。動水勾配に関して水位差を3水準設けた場合、式 (1) より得られる透水係数  $k_T$  は3つ存在し、3種類の線形の関数が算出される。透水係数  $k_T$  の値は、動水勾配  $i$  が小さくなると極めて大きい値になることが分かる。一方、式 (3) に示す累乗関数で近似すると、図中に示すような式となり、 $k'$ （図中では0.7）が1つ得られる。

浅野ら<sup>2)</sup>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、供試体を通る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関係は線形ではないことが示されている。また筆者ら<sup>5)</sup>も、6号砕石を用いた POC に対する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、その際に決定される非線形の透水係数を、空隙率のみによって推定できる式を提案した。

本報では、既報<sup>5)</sup>の6号砕石の実験結果と今回行った5および7号砕石の実験結果を併せて、式 (3) により非

\*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 修了生 (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)

線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数  $k'$ —空隙率の関係を表示し、平均骨材粒径と空隙率から係数  $k''$  を推定する POC の透水モデルを構築することを目的とする。

## 2. 定水位透水試験結果に及ぼす各種要因の影響

### 2.1 実験概要

#### (1) 要因と水準

表-1 に本実験の要因と水準を示す。供試体長さは 20, 10, 5cm の 3 水準とし、水位差は 10, 5, 1cm の 3 水準とした。これにより、動水勾配の測定範囲は 0.03~2.22 となった。越らにより、型枠付近ではそれ以外の箇所と比べて過大な空隙率になる壁効果の影響が検討され、壁効果は POC の透水係数に影響を及ぼすことが示されている<sup>9)</sup>ことから、壁効果の有無も実験の要因とした。供試体の設計空隙率は 15, 25 および 35% の 3 水準に変化させた（ただし、質量法による実測の空隙率は、10.6% から 47.3% の範囲となった）。

#### (2) 使用材料および調合

本実験で用いた POC の材料の特性を表-2 に、調合表を表-3 に示す。粗骨材には粒径の異なる 5, 6, 7 号碎石を用いた。水セメント比は 0.25 で一定とし、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。混和剤は、セメントペーストの状態で目標フロー値になるように高性能 AE 減水剤を添加した（添加率は表-3 参照）。

#### (3) 供試体の作製方法

φ15×20cm 円柱供試体を各水準 7 本（内 1 本は予備）ずつ作製した。POC の練混ぜには、強制一軸パン型ミキサ（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、粗骨材と結合材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、φ15×30cm の円柱型枠に高さ 20cm まで打ち込んだ。

供試体の打込みは二層で行い、型枠に充填される POC が目標空隙率となるために必要な質量を事前に調合表より算出し、POC の質量を量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。供試体表面の仕上げは型枠の高さ 30cm に対して 20cm まで打ち込むために、型枠の直径と同じ大きさの鉄板（質量 5360g）で POC の上面を叩くことで上面を整えた。また、タレが生じることを防ぐため、ジッキングを控えて、設計空隙率+5%の質量を許容範囲として作製した。材齢 2 日で脱型し、その後、壁効果の影響を比較するため、各水準 7 本作製した供試体のうち、各 3 本を内径 10cm のコアドリルを用いてコア供試体の採取を行った。

#### (4) 透水試験方法

透水試験の測定方法は、コンクリート工学会による透水試験方法（案）<sup>1)</sup>に準拠した。試験装置に関しては、コンクリート工学会により提案されている試験装置<sup>1)</sup>を参考にして、図-2 に示す透水円筒カラーを作製した。水位差を 3 段階に変化させた実験を行うために、越流口を越流水槽に対して 3 箇所設けた。実験の対象としない越流口は、水が漏れないようにキャップで止めて実験を行った。また、透水円筒カラーに供試体を設置しやすくするため、透水円筒カラーを二つに割り、供試体と透水円筒カラーの隙間を無くすために、2mm 厚のポリエチレンシートで供試体側面を覆い、透水円筒カラーを設置した後

表-1 要因と水準

要因	水準
粗骨材粒径	5号 (13-20mm), 6号 (5-13mm), 7号 (2.5-5mm)
設計空隙率 (%)	15, 25, 35*
壁効果	有, 無
水位差 (cm)	10, 5, 1
供試体長さ (cm)	20, 10, 5

[注] \*: 5, 7号のみ

表-2 POC の使用材料

使用材料	種類・特性値	
セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15g/cm <sup>3</sup>	C
水	上水道水	W
粗骨材	単粒度碎石 5号 実積率: 58.6%, 密度: 2.71g/cm <sup>3</sup> 単粒度碎石 6号 実積率: 58.1%, 密度: 2.73g/cm <sup>3</sup> 単粒度碎石 7号 実積率: 55.3%, 密度: 2.71g/cm <sup>3</sup>	G
混和剤	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系	Ad

表-3 POC の調合表

W/C	碎石の種類	空隙率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				ペーストフロー値 (mm)
			W	C	G	Ad (%)	
0.25	5号	15	116.3	465		C×0.15	150
		25	72.3	289	1588	C×0.15	
		35	28.3	113		C×0.15	
	6号	15	118.5	474		C×0.20	170
		25	74.5	298	1554	C×0.20	
		35	28.3	113		C×0.20	
7号	15	130.8	523		C×0.30	215	
	25	86.8	347	1499	C×0.30		
	35	42.8	171		C×0.35		

は、全体を金具で固定した。さらに、ガムテープおよび止水パテを用いて切れ目の隙間を埋めた。

測定は、まず水位差 10cm を測定し、その後、水位差 5cm および水位差 1cm の順で測定した。水槽の越流量を測定するのが一般であるが、本実験では、装置の特性から、より測定誤差の少なくなる水の投入量および透水円筒カラーからの越流量を測定し、その差分から供試体内部の流量を得た。透水量の測定時間は 30 秒間とし、各水準 3 回ずつ行った。

## 2.2 実験結果および考察

図-3 に、測定結果から算出した流速と動水勾配の関係を示す。同図には供試体長さごとに式 (3) で最小二乗

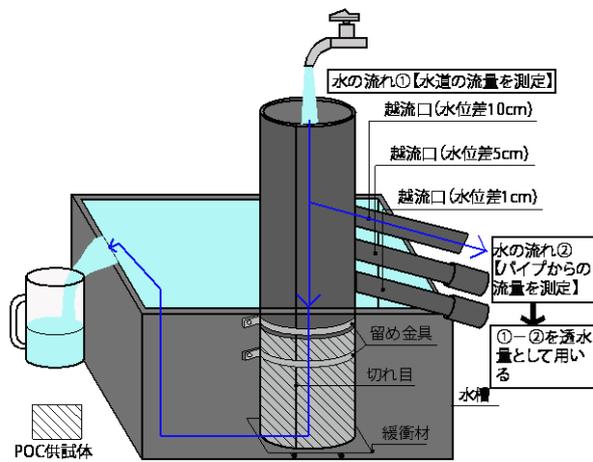
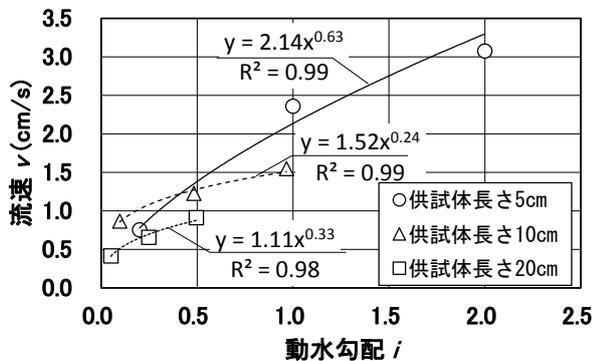
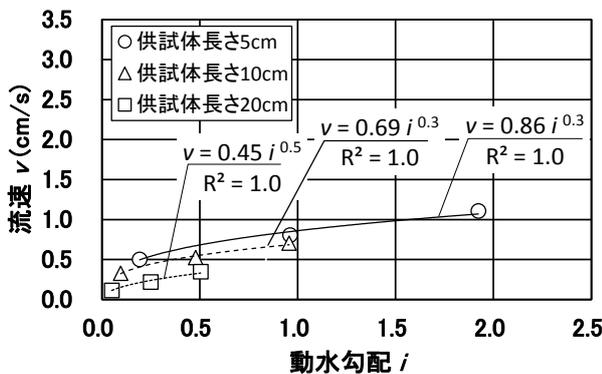


図-2 透水試験装置



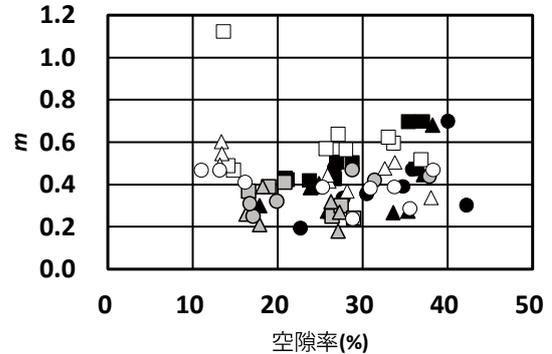
(a)  $V_R = 25\%$ , 6号砕石, 壁効果無



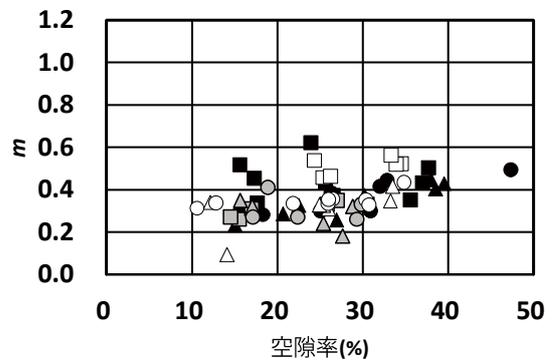
(b)  $V_R = 25\%$ , 7号砕石, 壁効果無

図-3 測定された流速  $v$  と動水勾配  $i$  の関係の例

		骨材粒径		
		5号	6号	7号
供試体長さ (cm)	20	■	□	□
	10	▲	△	△
	5	●	○	○

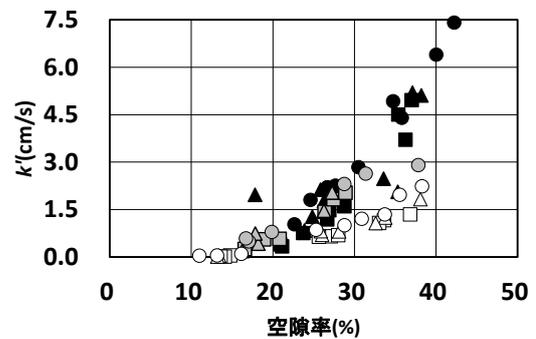


(a) 壁効果有 ( $\phi 15\text{cm}$ )

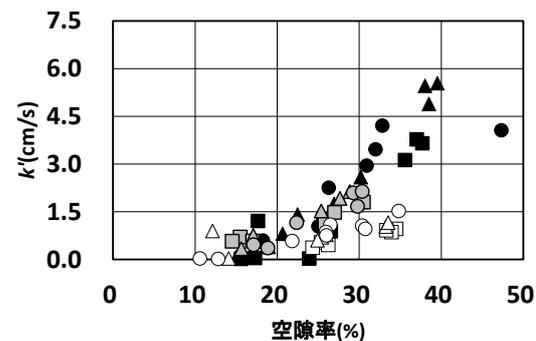


(b) 壁効果無 ( $\phi 10\text{cm}$ )

図-4 累乗指数  $m$  と空隙率の関係



(a) 壁効果有 ( $\phi 15\text{cm}$ )



(b) 壁効果無 ( $\phi 10\text{cm}$ )

図-5  $k'$  と空隙率の関係

法により近似した曲線を示す。いずれの場合も同様に、流速と動水勾配の間に非線形の関係が成立している。

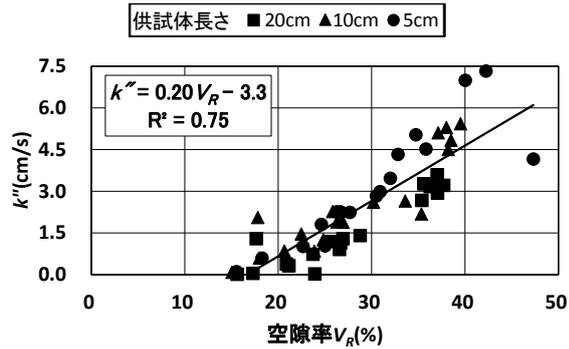
図-4に、式(3)の累乗指数  $m$  と実測空隙率との関係に及ぼす供試体高さの影響を示す。 $m$  に対しては空隙率および壁効果の有無の影響はみられず、 $m$  の値は概ね 0.2~0.7 の間に分布していることが分かる。図-5に、式(3)の  $k''$  と空隙率の関係を示す。ここで、 $m$  には図-4の値を用いた。図によれば、空隙率が大きくなるほど  $k''$  の値は大きくなる傾向がある。また、図 (a) と図 (b) を比較すると、壁効果の有無による違いは明確には見られない。

累乗指数  $m$  の値に粗骨材粒径や空隙率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(変数を1つにする)ために平均値  $m = 0.39$  で固定した(式(3)'参照)。

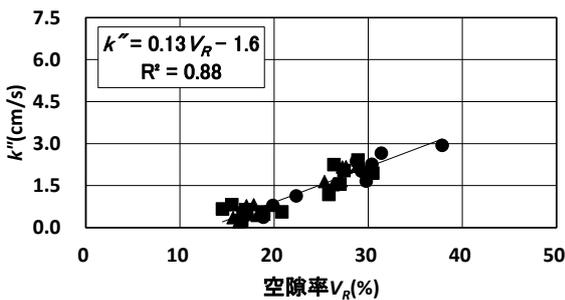
$$v = k'' \cdot i^{0.39} \quad (3)'$$

ここに、 $k''$  :  $m = 0.39$  としたときの非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数

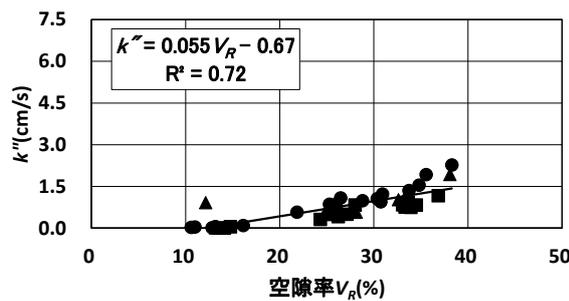
式(3)'を用いて、再度測定結果を最小二乗法で近似した時の  $k''$  を粗骨材粒径別に図-6に示す。供試体高さおよび



(a) 5号砕石



(b) 6号砕石



(c) 7号砕石

図-6  $k''$  と空隙率の関係

び壁効果の有無によらず、 $k''$  および空隙率  $v_r$  の間には、ある程度の相関関係があることが分かる。更にこの時の線形関係での近似式を図中に示し、傾き  $a'$  および y 切片  $b'$  と平均骨材粒径との関係を図-7に示す。以上より、式(4)の近似式が得られた。

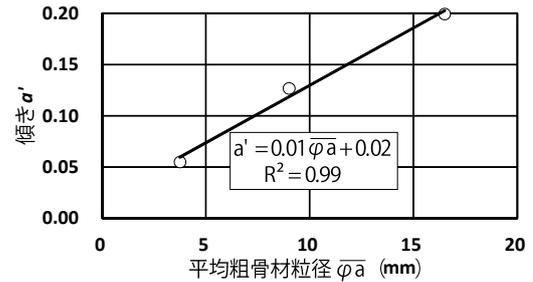
$$k'' = a' v_r - b' \quad (4)$$

$$\text{ここに、 } a' = 0.01 \bar{\varphi} \bar{a} + 0.02$$

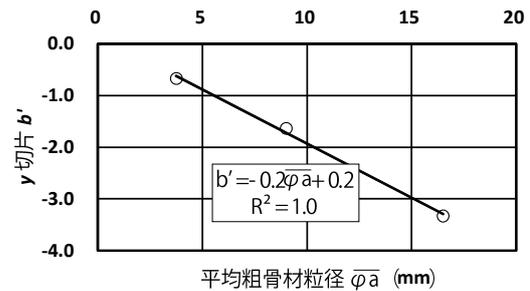
$$b' = -0.2 \bar{\varphi} \bar{a} + 0.2$$

$k''$  : 非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数 (cm/s),  $v_r$  : 空隙率(%),  $\bar{\varphi} \bar{a}$  : 平均骨材粒径 (mm) で表-4 参照

また、式(4)において、粗骨材粒径ごとの  $x$  切片を、図-8に示す。図-6における  $x$  切片は POC がほぼ透水しなくなる空隙率を示し、その値はおおよそ 12~16% である。ここで、平均粗骨材粒径が 17mm の 5号砕石の場合にその値が若干大きくなっているが、これは結合材に垂れが生じ、空隙が閉塞しやすくなったことの影響と考えられる。



(a) 傾き  $a'$



(b) y 切片  $b'$

図-7 図-5の各係数と平均粗骨材粒径  $\bar{\varphi} \bar{a}$  の関係

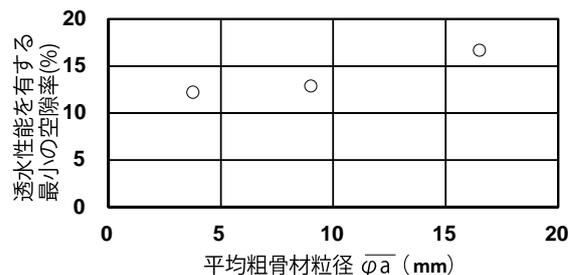


図-8 透水係数がほぼゼロになる空隙率 (%)

表-4 各粗骨材粒径の平均値 $\bar{\varphi a}$  (mm)

呼び名	粒径 $\varphi a$ の範囲(mm)	平均骨材粒径 $\bar{\varphi a}$ (mm)
7号	5 - 2.5	3.75
6号	13 - 5	9
5号	20 - 13	16.5

### 3. 動水勾配が非常に小さい場合の動水勾配と流速の関係

#### 3.1 実験概要

2章より、動水勾配の範囲が0.03以上の場合には検討することができたが、現実には舗装に使用される場合の動水勾配の範囲は0.001~0.01となることもあり、動水勾配が非常に小さい場合の動水勾配と流速の関係の検討も必要である。そこで、2章よりも供試体の長さを長くして、動水勾配が非常に小さい範囲の測定を行った。

##### (1) 要因と水準

本実験の要因と水準を表-4に示す。本実験では要因を水位差のみとし、1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 37および62cmの10水準とした。これにより、動水勾配の測定範囲は0.008~0.5となった。

##### (2) 使用材料および割合

POCの割合を表-5に示す。供試体の設計空隙率は25%とした(質量法による実測の空隙率は25%であった)。粗骨材には6号碎石を用い、水セメント比は0.30とした。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。

##### (3) 供試体の作製方法

供試体は15×15×120(cm)の角柱供試体を作製した。練混ぜは、強制一軸パン型ミキサ(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、粗骨材と結合材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、角柱型枠に打ち込んだ。

供試体の打設は二層で行い、型枠容積に充填されるポーラスコンクリートの質量を事前に割合表より算出し、ポーラスコンクリートの質量を量りながら打設することで、設計空隙率に近い供試体を作製した。供試体表面の仕上げは型枠振動機をあてた後、コテでPOCの上面を叩くことで上面を整えた。

養生は、型枠上面をビニルシートで密閉して封かん養生を行い、材齢3日まで養生した後に脱型した。壁効果の影響に関しては、壁効果が無い状態を再現するために、POCの側面部分にホワイトセメントを用いてセメントキャッピングを施した。キャッピング用セメントペーストが硬化した後に、POC供試体の両端部に透水円筒カラーを装着し、シリコン接着剤で接着した。POCの上部に

空気が溜まり透水を妨げないようにするため、また圧力水頭を測定するために、POCにコンクリートドリルで穴を開け、アクリルパイプを差し込み、その先端にビニルパイプをつなげた。

#### (4) 透水試験方法

コンクリート工学会により提案されている試験装置<sup>1)</sup>を参考にして、図-9に示す透水試験装置を作製した。水位差を10段階に変化させた実験を行うために、越流口を越流水槽に対して10箇所設けた。実験を行っていない場合の他の越流口は、水が漏れないようにキャップで止めて実験を行った。

透水試験の測定方法は、コンクリート工学会による透水試験方法(案)<sup>1)</sup>に準拠した。まず、水位差1cmの越流量を測定し、その後水位差2cm, 3cmの順で測定した。越流量の測定時間は30秒間とし、各水準3回ずつ行った。

#### 3.2 実験結果および考察

図-10に、測定された流速と動水勾配の関係を示す。動水勾配が大きくなると、流速は曲線的に増加する。この傾向は2章で得られた結果と一致する。同図中には、式(3)'による近似曲線も示すが、誤差はあるものの、動水勾配の小さい範囲においても、概ね式(3)'の形で近似できていると言える。図-11には、図-6(b)に示した

表-5 要因と水準

要因	水準
水位差 (cm)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 37, 62

表-6 POCの割合表

W/C	碎石の種類	空隙率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
			W	C	G
0.3	6号	25	82.2	274	1586

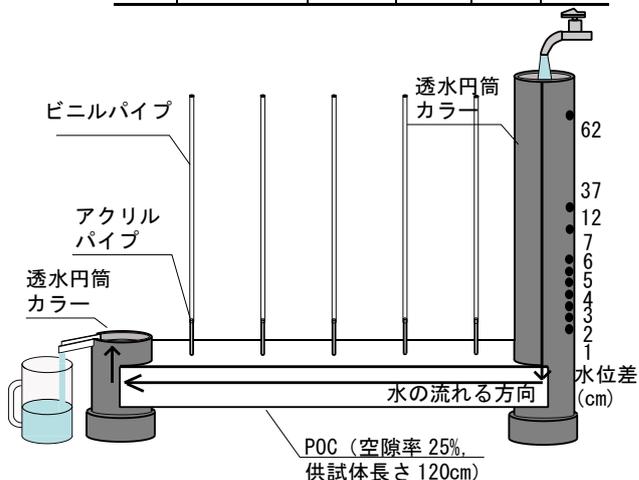


図-9 透水試験装置

(動水勾配が非常に小さい場合)

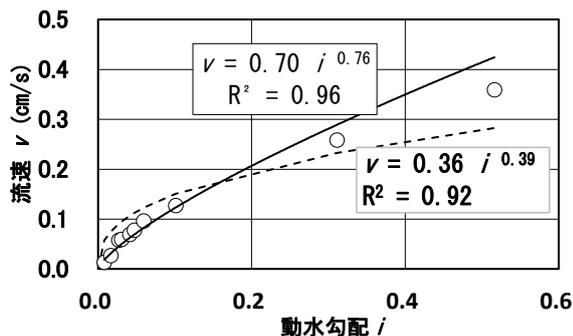


図-10 流速と動水勾配の関係  
(動水勾配が非常に小さい場合)

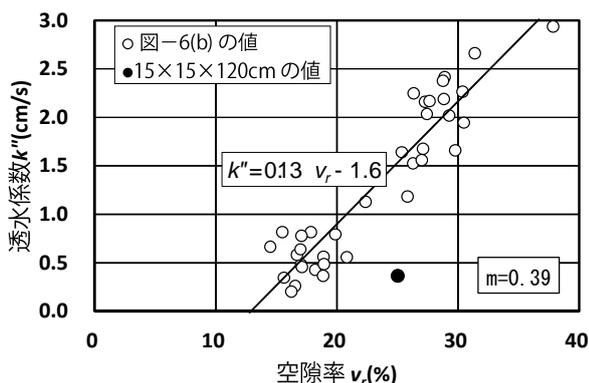


図-11 供試体の長さが流速—動水勾配の関係  
に及ぼす影響  
(動水勾配が非常に小さい場合)

6号砕石を用いた場合の $k''$ の測定結果と $15 \times 15 \times 120$ (cm)の供試体で得られた $k''$ との比較を示す。なおここでは、 $k''$ のみを比較するため、累乗指数 $m$ の値を0.39に固定してある。図によれば長さの長い供試体を用いた場合の $k''$ の値が、他の結果と比べて小さくなっているが、この理由として、透水試験時に供試体内の気泡が十分に抜けきらずに水が流れる断面積が減少したことの影響などが考えられる。

#### 4. まとめ

本実験では、透水試験結果に及ぼす測定条件として、粗骨材粒径、壁効果の有無、水位差、および供試体高さを要因とした実験を行った。更に、動水勾配が非常に小さい0.008-0.5の範囲で透水実験を行い、透水挙動の把握

を試み、以下の知見を得た。

- 1) 流速と動水勾配の関係を累乗関数で近似することで決定される非線形の透水係数を、空隙率さらに粗骨材粒径によって推定する式を得た。
- 2) 非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数を導入することで、測定時の水位差および供試体高さに影響されず、一定の係数により透水性を評価できることを確認した。
- 3) 動水勾配が非常に小さい範囲においても、累乗関数により流速と動水勾配の関係を近似できる。

#### 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）、内田寿久氏（株式会社 安芸砂利）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る。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：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集，2003
- 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過す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) 夏目実穂，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの透水試験結果に及ぼす測定条件の影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.36，No.1，pp.1690-1695，2014
- 6) 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