

論文 ポーラスコンクリートの非線形透水係数に関する一考察

畑中 重光*1・三島 直生*2・夏目 実穂*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おり、ダルシー則による透水係数については、既に多くの研究成果が報告されている。しかし内部の水の動きは乱流となり、その透水係数は動水勾配に応じて大きく変動することが指摘されている。本報では、まず既往の試験結果から、各種要因の影響を反映した透水係数の表示式を求めた。次に、非線形表示した透水係数の特徴を把握した上で、その定量化のための実験を行い、線形および非線形関数で表示した場合の透水係数の値を比較し、物理定数としての数値の取り扱いについては留意が必要であることを示した。

キーワード: ポーラスコンクリート, 透水係数, ダルシー則, 流速, 動水勾配

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、**図-1**に示すように、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）¹⁾が示され、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（すなわち、流速と動水勾配の関係は線形と仮定）として、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)²⁾ および式 (3)^{3, 4)} のように非線形関係となるという報告も存在する。本報では、式 (1) の線形関係による k_T を単に「透水係数」、式 (3) の非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の k' を便宜上「非線形透水係数」と称する。

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

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

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

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

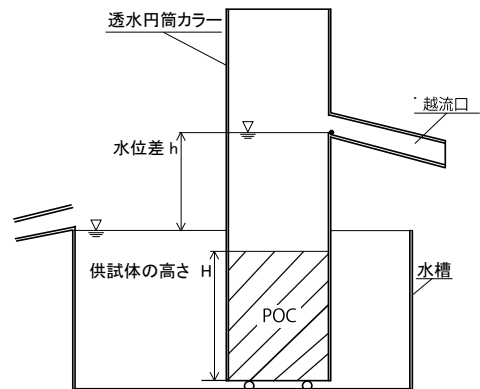


図-1 JCI により提案された透水実験の概要¹⁾

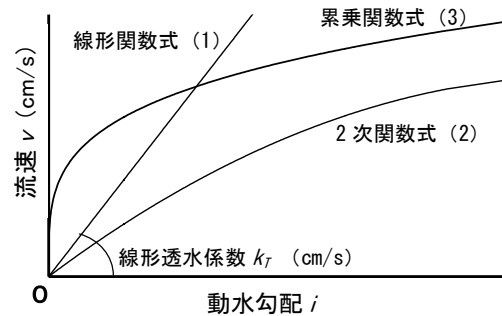


図-2 式 (1) ~ (3) の概念図

び b : 骨材粒径や空隙率で表される係数, $k' \cdot m$: 非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数

図-2に、式 (1) ~ (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、供試体を通過す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間の関係は線形ではないことが示されている。

また筆者ら⁵⁾も、6号砕石を用いた POC に対する実験

*1 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 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 修了生 (正会員)

表-1 各報告の試験方法と条件の概要

	玉井 ⁶⁾	岡本 ⁷⁾	梶尾 ⁸⁾	前川 ⁹⁾	上野 ¹⁰⁾
試験方法	JIS A 1218	JCI ¹⁾	ILブロック舗装要項	JCI ¹⁾	JCI ¹⁾
水位差 (cm)	30	10-15	11	9.5	15
供試体形状 (cm)	φ 10×20	φ 10×20	10×10×20	φ 10×20	φ 10×20
動水勾配	30/20= 1.5	12.5/20= 0.625	11/10= 1.1	9.5/20= 0.475	15/20= 0.75

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係数を、空隙率によって推定できる式を提案した。

本報では、既報⁵⁾に続き、まず式 (1) を定量化した数々の試験結果を整理し、各種要因の影響を反映した透水係数 (線形) の表示式を求める。次に、非線形の透水挙動を累乗関数で近似した式 (3) 中の係数の特徴を把握した上で、その定量的評価のための実験を行う。その結果に基づき、線形および非線形関数で表示した場合の両者の透水係数の値を比較し、これらの数値の取り扱いについて考察する。

2. 各報告による透水係数—空隙率の関係

本章では玉井ら⁶⁾、岡本ら⁷⁾、梶尾ら⁸⁾、前川ら⁹⁾、上野ら¹⁰⁾による透水実験の実験結果を参照した。各報告の試験方法および試験条件の概要を表-1に、各文献^{6) -10)}から算出された透水係数 k_T (cm/s) と空隙率 V_R (%) の関係を図-3に示す。粗骨材の粒径は、5, 6, 7, 8号の範囲であり、ここでは図中に示したように、これらのデータは概ね破線で示す範囲に存在すると見なした。図によれば、骨材粒径が大きくなるほど破線で囲まれた範囲の透水係数も大きくなる。

表-2に示す平均骨材粒径を用い、透水係数 k_T を空隙率 V_R と平均骨材粒径 $\bar{\varphi a}$ によって表示したところ、式 (4) のような近似式が得られた。式 (4) によって得られる透水係数 k_T と空隙率 V_R の関係を既往の実験データとともに図-4に示す。図によれば、粗骨材粒径が大きくなるほど近似曲線の傾きが大きくなる傾向が見られる。

$$k_T = \exp \{ a \times (V_R - V_0) \} - 1 \quad (4)$$

ここに、 $a = 0.0029 \bar{\varphi a} + 0.03$

$$V_0 = -0.68 \bar{\varphi a} + 20$$

k_T : 透水係数 (cm/s),

V_R : 空隙率 (%),

V_0 : x切片 (%)

ここで、式 (4) の x切片に着目すると、この点の空隙率は、透水係数がほぼゼロとなる空隙率 V_0 を与えることになる。図-5は、式 (4) から得られる x切片 V_0 と平均骨材粒径 $\bar{\varphi a}$ の関係を示したものである。図によれば、透水性をもつ最小の空隙率を示す V_0 は、粗骨材の粒径が大きくなるほど小さくなる傾向がある。

表-2 各粗骨材粒径の平均値 $\bar{\varphi a}$ (mm)

呼び名	粒径 $\bar{\varphi a}$ の範囲 (mm)	平均骨材粒径 $\bar{\varphi a}$ (mm)
8号	2.5-1.2	1.85
7号	5-2.5	3.75
6号	13-5	9
5号	20-13	16.5

◆ 8号T (i=1.5) ◇ 8号M (i=0.475) ■ 7号T (i=1.5) □ 7号K (i=1.1)
▲ 6号T (i=1.5) ▲ 6号O (i=0.625) △ 6号K (i=1.1) ● 5号U (i=0.75)

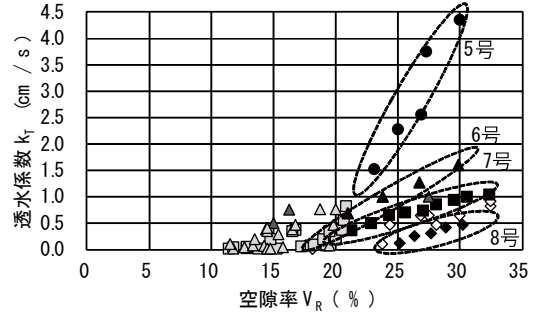


図-3 既往の5文献による透水係数と空隙率の関係

◆ 8号T (i=1.5) ◇ 8号M (i=0.475) ■ 7号T (i=1.5) □ 7号K (i=1.1)
▲ 6号T (i=1.5) ▲ 6号O (i=0.625) △ 6号K (i=1.1) ● 5号U (i=0.75)
近似曲線 --- 8号 - - - - 7号 6号 ——— 5号

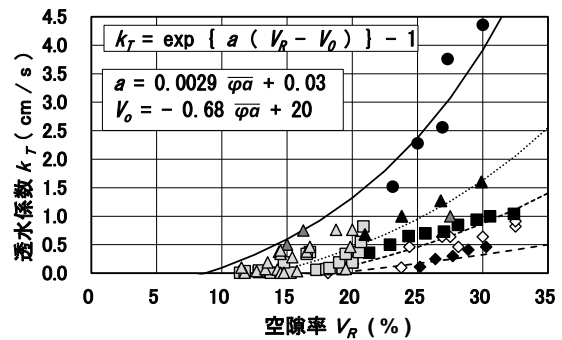


図-4 近似式 (4) の計算値と既往のデータとの比較

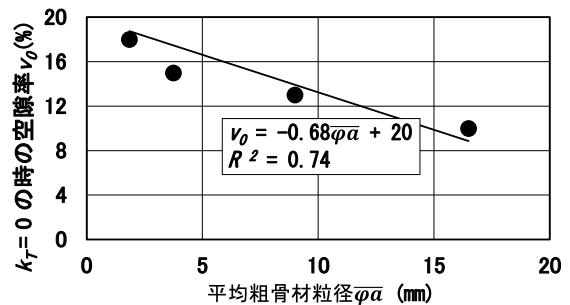


図-5 透水係数がほぼゼロになる空隙率 V_0

3. 非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数 k' および m について

3.1 非線形関係式 (3) の特徴

上記 2. で取り扱った透水係数 (線形) と式 (3) 中の k' の関係について考察しておく。式 (3) は、 $v = k' \cdot i^m$ の形で定義されているが、ここでは便宜上、既報⁵⁾ で得られた k' の値を参考に、 $k' = 2$ (cm/s) と固定し、 m が流速 v と動水勾配 i の関係に及ぼす影響を図-6 に示す。動水勾配 $i = 1$ の時、 m の値に関わらず、流速 $v = k' = 2$ (cm/s) の一定値をとることが分かる。

図-7 に、累乗指数の値を $m = 0.3$ と固定し、 k' が流速 v と動水勾配 i の関係に及ぼす影響を示す。動水勾配 i が等しい場合、流速 v は k' に比例することが分かる。

図-8 に、累乗指数の値を $m = 0.3$ と固定し、動水勾配 i が k' と透水係数 k_T の関係に及ぼす影響を示す。両者の間には、動水勾配 i の大きさにかかわらず、正比例の関係があることが分かる。

3.2 透水係数 k_T と非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数 k' の関係

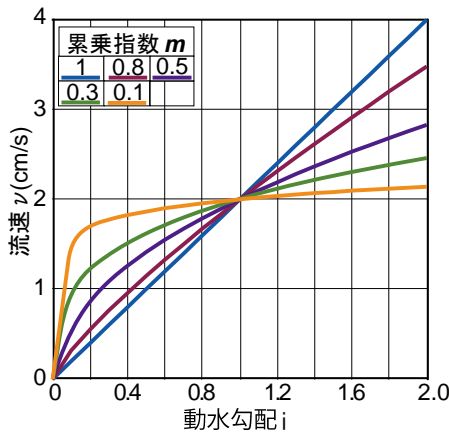


図-6 式 (3) による v と i の関係 (m の影響) ($k' = 2$ と仮定, すなわち $v = 2i^m$)

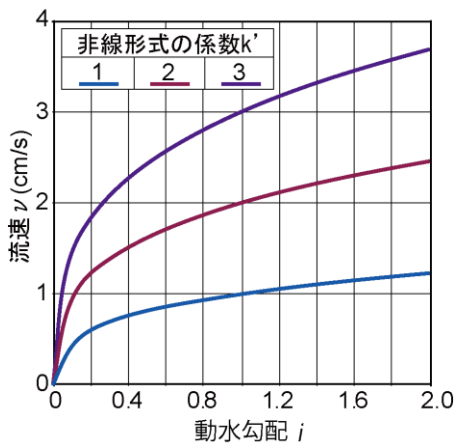


図-7 式 (3) による v と i の関係 (k' の影響) ($m = 0.3$ と仮定, すなわち $v = k' \times i^{0.3}$)

図-9 は、式 (3) から得られる流速 v - 動水勾配 i 曲線に、動水勾配の値が $i = 0.5$ と 1.0 の場合の透水係数 k_T (線形) を同時に示したものである。なお、後述する実験結果を参考に、式 (3) 中の累乗指数は $m = 0.3$ 、 k' は $k' = 2$ という、一般的な値を仮定している。また表-3 に、透水係数 k_T の計算結果を示す。この計算結果によれば、動水勾配が $i = 0.5$ から 1.0 に変化すると、透水係数 k_T は 3.2 から 2.0 に変動する。この計算例を踏まえれば、前掲の表-1 の実験データ (動水勾配は、 $0.475 \sim 1.5$) より得

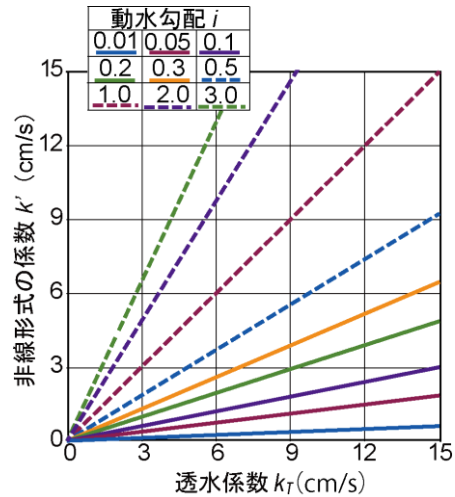


図-8 式 (3) の k' と式 (1) の透水係数 k_T の関係 ($m = 0.3$ と仮定) (すなわち $k' = k \cdot i^{0.7}$)

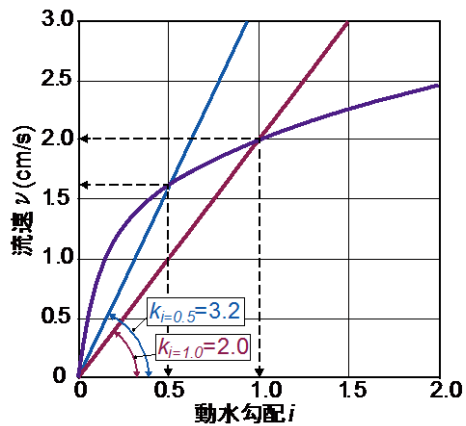


図-9 式 (1) による k_T の変化 ($m = 0.3$ 、 $k' = 2$ と仮定した場合)

表-3 透水係数 k_T の計算値 (式 (3) で $m = 0.3$ 、 $k' = 2$ とした場合)

動水勾配 i	流速 v (cm/s)	透水係数 k_T (cm/s)
0.1	1.0	10
0.5	1.6	3.2
1.0	2.0	2.0

た式 (4) の精度には、50%程度のばらつきを含んでいる可能性が高いことに留意する必要がある。

4. 透水試験の実施と線形・非線形式の透水係数の比較

ここでは、既報⁵⁾の実験結果を引用して考察を行う。

4.1 透水試験の概要

表-4 に実験の要因と水準を示す。動水勾配を変化させるために供試体長さは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、動水勾配は0.05~2.22の範囲となった。供試体の設計空隙率は15, 25%の2水準に変化させた(ただし、質量法による実測の空隙率は、14.5%から37.8%の範囲となった)。

図-10 に透水試験装置を示す。他の実験方法等については既報⁵⁾を参照されたい。

表-4 要因と水準⁴⁾

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

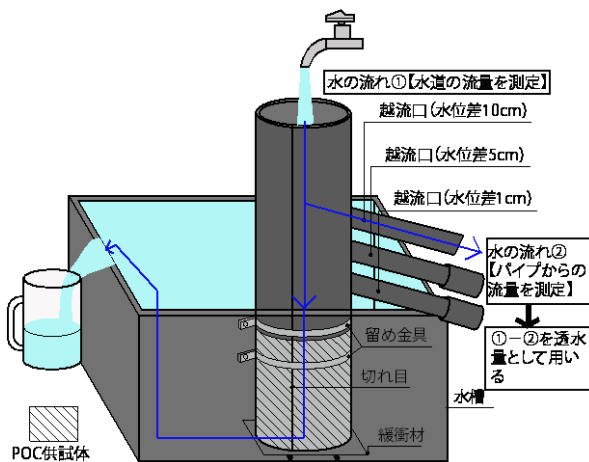


図-10 透水試験装置⁴⁾

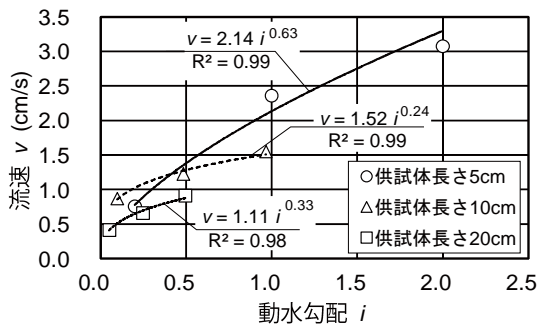


図-11 測定された流速 v と動水勾配 i の関係の例 ($V_R = 25\%$, 6号砕石, 壁効果無)⁴⁾

4.2 線形・非線形式の透水係数の比較

図-11⁵⁾に、6号砕石を用いた場合の測定結果から算出した流速と動水勾配の関係の例を示す。流速と動水勾配の間に非線形の関係が成立している。

図-12 は、ダルシー則である線形式 (1) で近似した結果と累乗関数の式 (3) で表示した結果を比較したもの

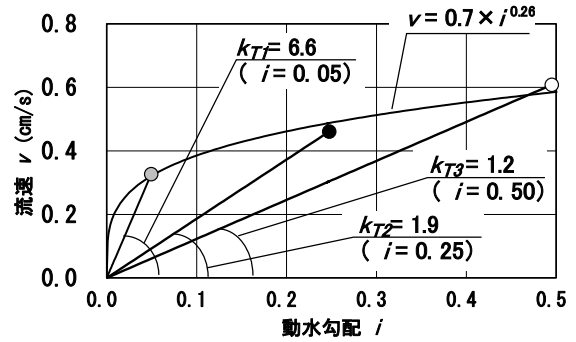
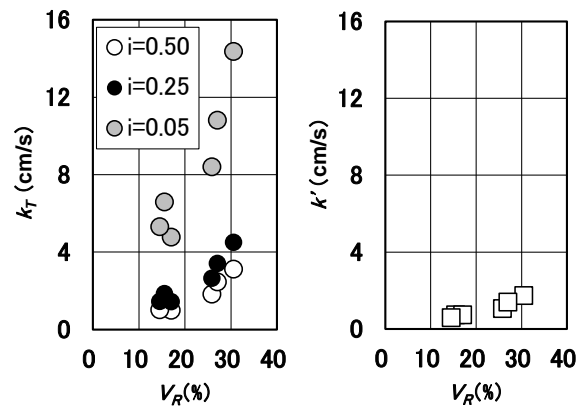


図-12 流速 v と動水勾配 i の関係の測定結果の例



(a) 線形関係 (式 (1)) (b) 累乗関係 (式 (3))

図-13 式 (1) および式 (3) を用いた場合の透水係数の実験値⁴⁾

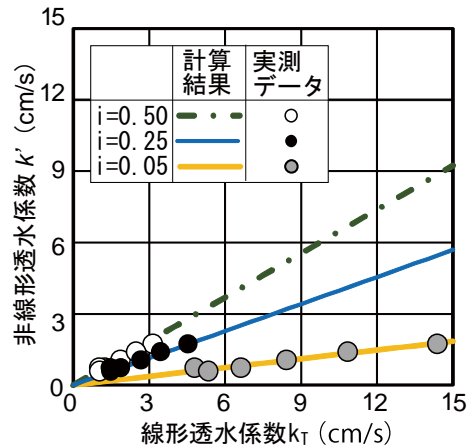


図-14 式 (3) の k' , 式 (1) の k_T および実測値の関係 ($m = 0.3$ と仮定)

である。本実験では動水勾配に関して水位差を3水準設けたことから、式(1)より得られる透水係数 k_T は3つ存在し、3種類の線形関数が得られることになる。ここでは、それぞれの透水係数を動水勾配が小さいものから順に k_{T1} 、 k_{T2} 、 k_{T3} とする。透水係数 k_{T1} は、 k_{T2} および k_{T3} と比べて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' が1つ得られる。

図-13に、式(1)および(3)から得られる透水係数 k_T および k' と空隙率 V_R との関係を示す。図(a)によれば、同一の供試体でも動水勾配の違いによって異なる k_T が算出されるため、 k_T と V_R の関係は動水勾配によって異なる。一方で図(b)によれば、空隙率 V_R とある一定の関係で k' が得られている。今回の実験の範囲では、透水係数 k_T として1.0-14 (cm/s)、 k' (m は0.3の一定)として0.6-1.7 (cm/s)の範囲の値が得られている。なお、 k' は、 $k' = k_T \cdot i^{-m}$ ゆえ動水勾配 $i = 1$ のときの k_T と等価である。また図-14に累乗指数の値を $m = 0.3$ と固定し、式(3)の k' 、式(1)の k_T および実験による実測値の関係を示す。両者の関係は、図-8で示したように、動水勾配ごとにほぼ線形の関係上に存在することが確認できる。

5 まとめ

本報では、ポーラスコンクリートの非線形の透水挙動を累乗関数で近似した場合の係数について考察した。本研究の結果はおおよそ以下のようにまとめられる。

- 1) 既往の透水試験結果を整理し、ダルシー則により算定される透水係数 k_T と空隙率の関係を粗骨材粒径別に大別し、透水係数を概算できる表示式を提示した。
- 2) ダルシー則による透水係数は、動水勾配によって異なる値を示し、動水勾配が例えば0.5~1.0の範囲では、おおよそ50%程度の変動が生じる。
- 3) 非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数は、動水勾配の大きさに関わらず、空隙率をパラメータとして推定できる。
- 4) 線形および非線形関数で表示した場合の透水係数の値は、単位は同じであるものの、大きく異なる場合があるため、数値の取り扱いについては注意が必要である。すなわち、累乗指数 m の値を固定(本報では $m = 0.3$)するなどして、非線形式の係数 k' の物理定数としての位置づけを明快にしておく必要

があろう。

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)、中川武志氏((株)ファイナルマーケット代表取締役)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) 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) 石田哲朗ほか：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) 玉井元治，杉野守，芦田馨：緑化コンクリートの研究，セメント・コンクリート論文集 No.48，pp.672-677，1994
- 7) 岡本享久，安田登，増井直樹，佐藤文則：ポーラスコンクリートの製造・物性・試験方法，コンクリート工学 Vol.36，No.3，pp.52-62，1998.3
- 8) 梶尾聡，中村秀三，野田悦郎，中原大磯：ポーラスコンクリート舗装の品質特性と供用性に関する報告，コンクリート工学 Vol.42，No.7，pp.24-31，2004
- 9) 前川明弘，山本晃，三島直生，畑中重光：小粒径ポーラスコンクリートの各種特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.28，pp.1397-1402，2006
- 10) 上野雅之，碓井浩，岡本享久，吉森和人：ポーラスコンクリートの空隙構造の定量化と物理特性に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集 No.50，pp.376-381，1996

