

論文 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

夏目 実徳*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おり、既に多くの研究成果が報告されている。しかし、その測定条件が測定結果に及ぼす影響についての報告は多くない。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、6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、および試験体高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、空隙率のみ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、透水試験、流速、動水勾配、壁効果、水位差、試験体高さ、空隙率

1. はじめに

ポーラスコンクリートは連続空隙による様々な性能を有することから、多岐に渡って適用が試みられている。近年では、ポーラスコンクリート舗装の有する連続空隙を利用して貯水・排水することで、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ゲリラ豪雨対策としての利用も提案されている¹⁾。ゲリラ豪雨対策としてポーラスコンクリート舗装を実用化するためには、ポーラスコンクリートの透水性の定量化と、ポーラスコンクリート舗装内部の水の流動挙動の把握が不可欠となる。

ポーラスコンクリートの透水係数の測定方法に関しては、コンクリート工学会により土質試験を準用した定水位透水試験方法(案)²⁾が示されており、一般的に用いられているが、試験方法自体の妥当性を論じた研究は少ない。

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。しかし、浅野ら³⁾によれば、動水勾配が0.17~1.26の範囲では、供試体を通過する流れは概ね乱流状態であり、流速と動水勾配の間関係は線形ではなく、式(1)に示すような2次関数で示されるとしている。

$$i = av + bv^2 \tag{1}$$

ここに、 i ：動水勾配、 v ：流速(cm/s)、 a 、 b ：骨材粒径や空隙率で表される係数

また、ポーラスコンクリートの透水性を評価するには、**図-1**に示す壁効果(またはせき板効果)の影響を考慮する必要がある。壁効果とは、ポーラスコンクリートを

打ち込む際に型枠と接する箇所では、それ以外の箇所と比べて空隙率が大きくなる現象を指す。これまでに、透水試験結果に及ぼす壁効果の影響に関しては、越ら⁴⁾により検討され、壁効果を低減したポーラスコンクリートの透水試験方法として、供試体表面に特殊発泡ゴムを巻きつけた試験方法が提案されている。

透水試験に用いる供試体の形状に関しては、前述の透水試験方法(案)²⁾では、円柱供試体およびコア供試体では高さが直径の2倍とすることが求められており、一方で角柱供試体(10×10×20cm)では高さとの比が1および1/2とするとされており、透水係数に及ぼすこれらの形状の違いについては十分に検証がなされていない²⁾のが現状である。

以上のように、今後さらに多様化することが予想されるポーラスコンクリートの使用形態に則した透水性性能の評価の必要性、および今後の国内におけるポーラスコンクリートに関する各種規準の整備に向けて、現状の試験方法の妥当性の検証と、必要に応じて、より広範囲かつ正確な測定方法の検討が求められている。

そこで、本報では、コンクリート工学会による透水試験方法²⁾を準用し、測定結果に影響を及ぼすと考えられる試験条件として、供試体の壁効果の有無、水位差およ

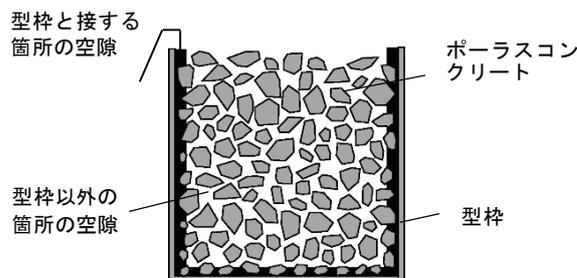


図-1 壁効果の説明図

*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)

び供試体高さの3つの要因を取り上げ、それに供試体の空隙率を要因として加えた実験を行い、現状の透水試験方法の妥当性の検証を試みる。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

本実験の要因と水準を表-1 に示す。壁効果の影響に関しては、コンクリート工学会による方法²⁾では、透水円筒カラーと供試体の間を、薄いシートで埋めて壁効果の影響を軽減するが、本実験では、壁効果の有無に関わらず、2mm厚の発泡ポリエチレンシートを型枠で圧着して隙間を埋めた状態で測定した。壁効果の有無は円柱供試体とコア供試体を比較することで、供試体自身に壁効果の有無の2種類の状態を作った。供試体高さは、20、10、5cmの3水準、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0.05~2.22の範囲となった。

2.2 試験装置

コンクリート工学会により提案されている試験装置²⁾を参考にして、写真-1 および図-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。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、ポリエチレンシートで供試体を覆い、透水円筒カラーに設置した後は、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。透水円筒カラーはφ15cm用およびφ10cm用のものをそれぞれ一つずつ作製した。

2.3 試験体作製

ポーラスコンクリートを作製するために使用した材料の特性値を表-2 に、調合表を表-3 に示す。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、全ての供試体の範囲では14.5%から37.8%であった)。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。粗骨材には6号砕石を用い、結合材はW/C=0.25としたセメントペーストとし、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)。

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



写真-1 透水試験（水位差1cm）の様子

表-1 要因と水準

要因	水準
設計空隙率(%)	15, 25
(質量法による実測の空隙率(%))	(14.5-37.8)
供試体高さ(cm)	20, 10, 5
水位差(cm)	10, 5, 1
壁効果	有、無

表-2 ポーラスコンクリートの使用材料

使用材料	特性値
セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.15g/cm ³
水	上水道水
粗骨材	三重県伊賀市真泥寺東山産単粒度砕石 6号 (5-13mm) 表乾密度2.73g/cm ³ 実積率58.1%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

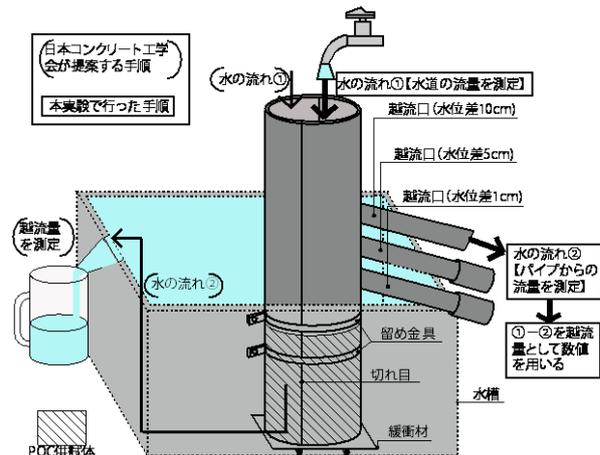


図-2 透水円筒カラー

表-3 ポーラスコンクリートの調合表

砕石	W/C	空隙率 (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	セメントに対する混和剤の添加率 (%)	結合材の目標フロー値
6号 (5-13mm)	0.25	15	119	474	1554	0.200	170
		25	74.5	298			

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、円柱型枠 $\phi 15 \times 30 \text{cm}$ に高さ 20cm まで打設した。

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調合表より算出し、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）でポーラスコンクリート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。

図-3 に示すように、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抜きを行った。

供試体の高さが 20cm の状態で透水試験を行った後、コンクリートカッターを用いて、供試体を高さ 20cm から供試体高さ 10cm にカットした。カットした供試体の底部の方を用いて、同様に透水試験を行った。さらに、供試体を高さ 5cm にカットした後、同様に透水試験を行った。

2.4 試験方法および測定項目

試験は、作製された供試体の空隙率試験および透水試験を行った。

空隙率の測定は質量法²⁾で行い、コア抜きおよびカットを行う毎に測定した。

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）²⁾に準拠した。まず、水位差 10cm の越流量を測定し、その後水位差 5cm および水位差 1cm の順で測定した。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. 実験結果と考察

3.1 空隙率

図-4 にコア抜きが供試体の空隙率に及ぼす影響を示す。空隙率 17% から 19% の範囲の供試体に関しては、コア抜き後の空隙率の方が平均 2.6% 小さくなっている。一方、空隙率 26% から 32% の範囲の供試体に関しては、両者あまり差がない。以上の結果からは、空隙率が小さい方が壁効果の影響が大きくなるといえる。

また、図-5 に供試体の高さを 20cm、10cm、5cm とカットしたことによる空隙率の影響を示す。供試体高さが 5cm の供試体はややばらつきが大きくなっているものの、明確な空隙率の違いは見られず、高さ方向には概ね一樣な供試体を作製されたと言える。

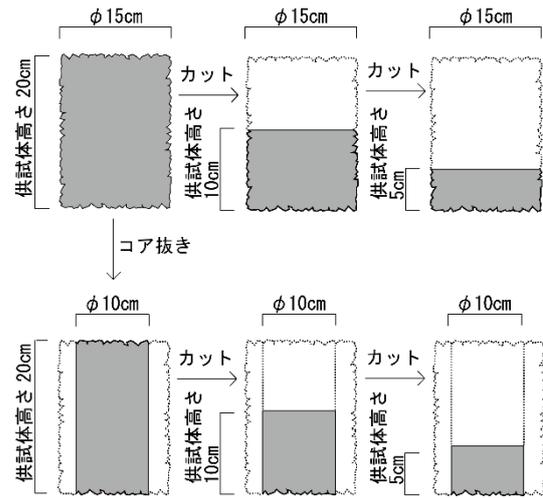


図-3 供試体のカットの過程

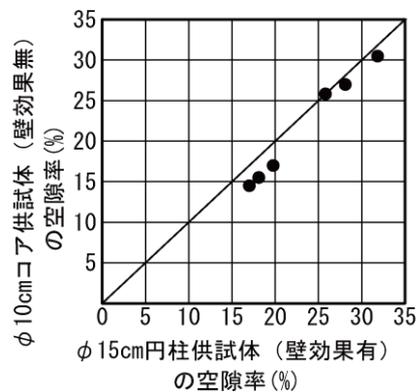
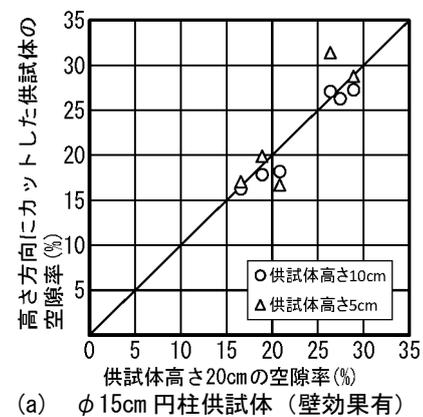
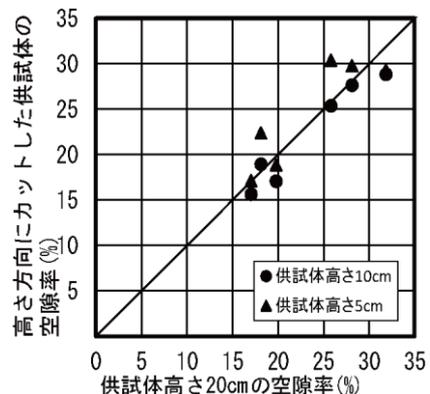


図-4 コア抜きによる空隙率の比較



(a) $\phi 15 \text{cm}$ 円柱供試体（壁効果有）



(b) $\phi 10 \text{cm}$ コア供試体（壁効果無）

図-5 供試体高さが空隙率に及ぼす影響

3.2 流速と動水勾配の関係

ダルシー則が成立する層流域においては、一般の地盤材料において、供試体内の平均流速 v と動水勾配 i の間で式(2)が成り立つ。

$$v = k \cdot i \quad (2)$$

ここに、 k : 透水係数(cm/s)

また、水の状態が乱流域においては、式(3)の形で表される⁵⁾。

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

ここに、 k' : 非線形透水係数(cm/s), m : 実験定数

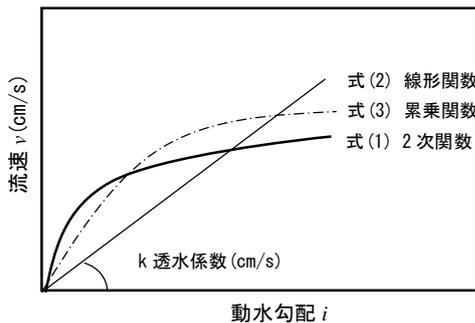


図-6 3つの式の概念図

浅野ら³⁾によると、ポーラスコンクリートでは、両者の関係は前掲の式(1)のようになる。

比較のため、図-6に式(1)~(3)の概念図を示す。なお、本論文では縦軸を流速として表記している。

図-7に、本実験で得られた供試体内の平均流速と動水勾配の関係の全データを白抜きで示す。ここで、同一供試体を用いて水位差を変化させたデータを同じマークで示し、式(3)の形式で最小二乗法で近似した曲線も示す。また、同図中には、浅野ら³⁾の推定式に本実験条件を代入して得られた推定値を黒塗りで示す。式(1)中の係数 a , b については、下式³⁾を用いた。

$$a = 0.0245D^{-2.171} + 0.346\mu(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3 \quad (4)$$

$$b = l_1 + l_2\rho(1-\varepsilon)/\varepsilon^3 \quad (5)$$

ここで、 D : 骨材の平均粒径(cm), μ : 水の粘性係数($\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$), ε : 空隙率, ρ : 水の密度(g/cm^3)
ただし、本実験では、 $\mu=0.0127(\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s})$, $\rho=1.0(\text{g}/\text{cm}^3)$ とした。

図-7に示す本実験の測定データ(白抜き)によれば、流速と動水勾配の関係は原点を通る線形関係ではなく、曲線的な関係にあり、式(3)により精度良く近似できてい

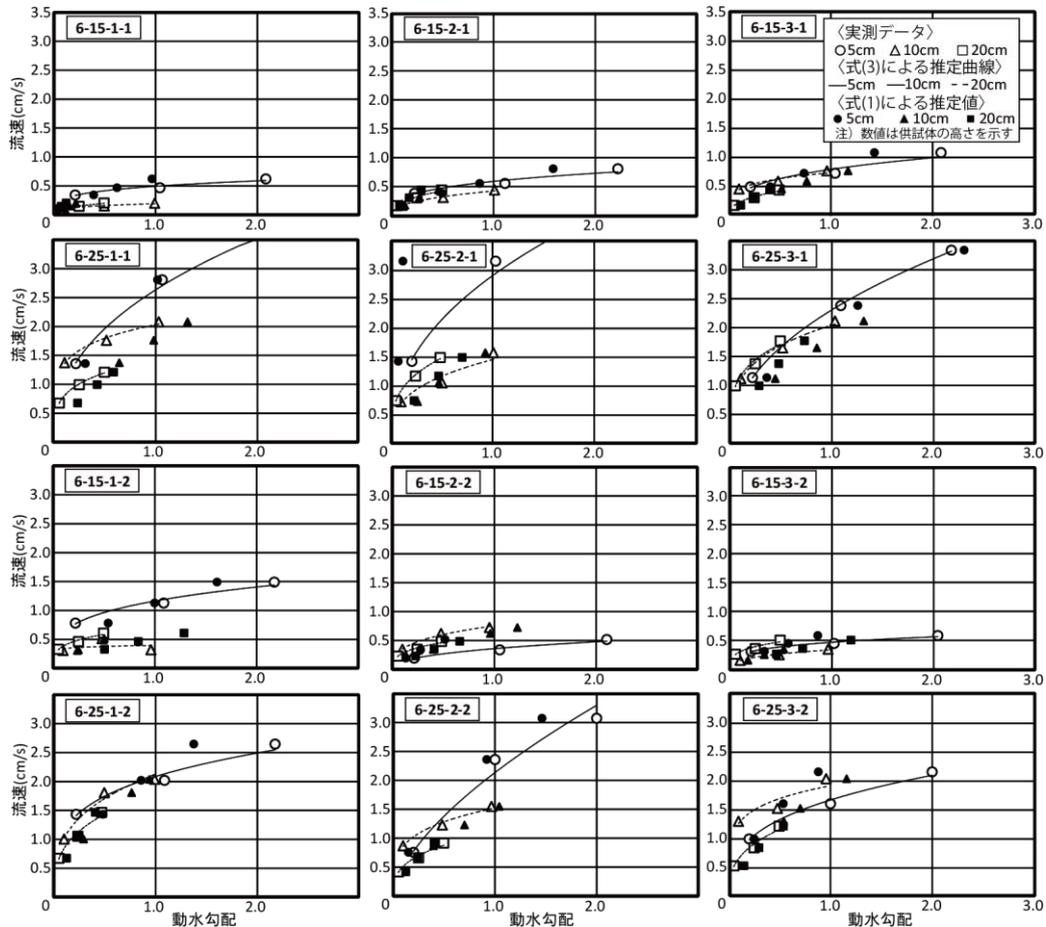


図-7 実測結果と推定結果の比較

(供試体番号 : (骨材粒径 6号) - (空隙率) - (供試体 No.) - (壁効果有 1, 無 2))

表-4 近似式(3) $v = k' \times i^m$ の係数 k' , m および決定係数 R^2

		供試体高さ20cm				供試体高さ10cm				供試体高さ5cm			
		空隙率	k'	m	R^2	空隙率	k'	m	R^2	空隙率	k'	m	R^2
壁効果有	6-15-1-1	16.6	0.255	0.37	0.99	16.3	0.190	0.26	0.98	17.0	0.493	0.25	0.96
	6-15-2-1	20.8	0.572	0.41	0.99	18.2	0.424	0.39	0.99	16.7	0.589	0.31	0.95
	6-15-3-1	18.9	0.560	0.39	0.99	17.8	0.739	0.21	0.95	19.9	0.796	0.32	0.94
	6-25-1-1	26.3	1.43	0.25	1.0	27.1	2.03	0.18	0.99	31.4	2.64	0.42	1.0
	6-25-2-1	27.4	1.83	0.30	1.0	26.3	1.46	0.32	0.94	37.8	2.91	0.44	0.99
壁効果無	6-25-3-1	28.9	2.03	0.24	0.98	27.3	2.04	0.27	0.99	28.7	2.31	0.47	1.0
	6-15-1-2	15.5	0.701	0.26	0.97	18.9	0.395	棄却(0.068)	棄却(0.078)	22.4	1.16	0.27	0.98
	6-15-2-2	17.0	0.582	0.31	0.98	17.1	0.756	0.32	0.99	18.9	0.359	0.41	0.98
	6-15-3-2	14.5	0.573	0.27	0.94	15.6	0.337	0.35	0.99	17.1	0.465	0.27	0.98
	6-25-1-2	30.5	1.80	0.33	0.98	28.8	2.13	0.32	0.98	29.3	2.09	0.26	0.98
	6-25-2-2	25.8	1.11	0.33	0.98	25.4	1.52	0.24	0.99	30.4	2.14	棄却(0.63)	0.99
	6-25-3-2	27.0	1.48	0.35	0.97	27.6	1.92	0.18	0.85	29.8	1.67	0.33	0.99

ることがわかる。また、式(1)³⁾による推定値(黒塗り)も、一部で推定精度が悪いものも見られるが、概ね近い値として推定されている。ただし、本実験の要因である供試体高さおよび壁効果の有無の影響に関しては、供試体毎の空隙率にばらつきがあるために直接比較することができず、同図から傾向をつかむことは非常に困難である。このため、式(3)により近似された係数による整理を試みる。

表-4に、式(3)で近似した場合の係数の一覧を示す。ここで、測定時の誤差などで他と比べて極端に値が異なったものは「棄却」として表示してある。

図-8に、式(3)の指数 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。供試体高さによらず、指数 m と空隙率の間には相関がみられず、また、図-8(a)、(b)の比較より、壁効果の有無に関わらず m の値は0.1~0.5の間に分布していることが分かる。

図-9に、式(3)の係数 k' と空隙率の関係を示す。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り、両者の関係には供試体の高さの影響は見られない。また図-9(a)、(b)の比較より、壁効果の有無によらずほぼ同じ位置に分布していることが分かる。

以上の結果から、空隙率との間に相関が見られない式(3)における指数 m の平均値を算出し、式(3)'を導いた。

$$v = k'' \cdot i^{0.312} \quad (3)'$$

ここに、 $k'' : m = 0.312$ としたときの非線形透水係数式(3)'を用いて、再度図-7の測定結果を最小二乗法で近似した時の k'' を図-10に示す。供試体高さおよび壁効果の有無によらず、 k'' および空隙率 v_r の間には、強い相関関係があることが分かる。そこで、近似式を算出すると、式(6)および式(7)の近似式が得られた。

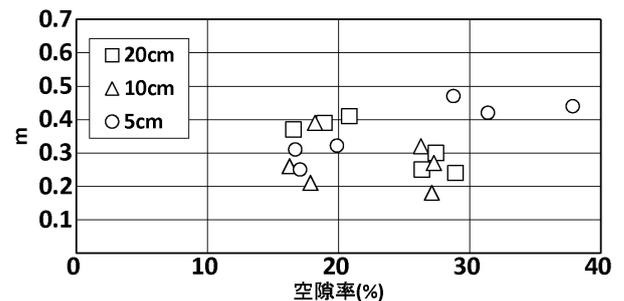
$$k'' = 0.126v_r - 1.7 \quad (6)$$

$$k'' = 0.0722 \{ \exp(0.11v_r) - 1 \} \quad (7)$$

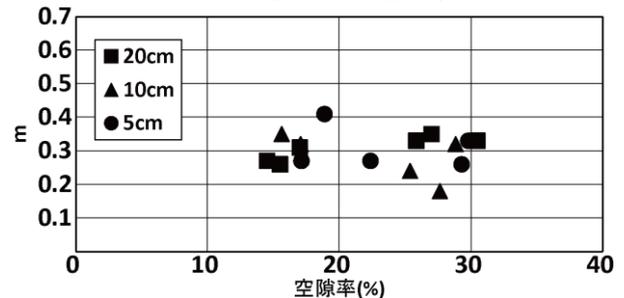
ここに、 k'' : 透水係数(cm/s), v_r : 空隙率(%)

線形関係の式で近似した式(6)の x 切片 ($v_r = 13.5\%$) は、ポラスコンクリートがほぼ透水しなくなる空隙率を示す。

また、指数関数で近似した式(7)に関しては、結合材垂

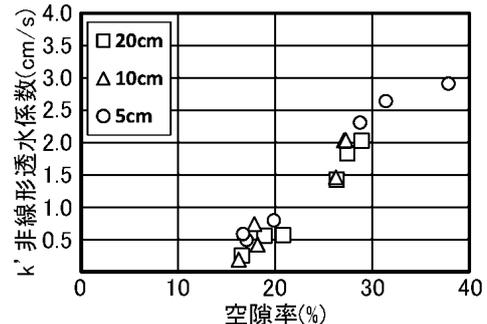


(a) $\Phi 15\text{cm}$ 円柱供試体 (壁効果有)

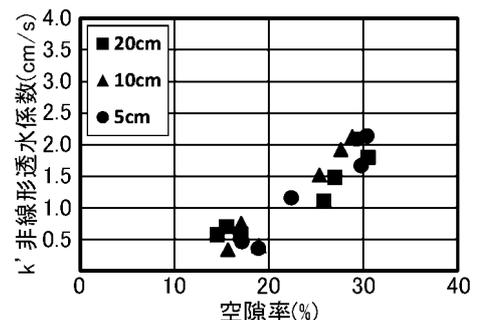


(b) $\phi 10\text{cm}$ コア供試体 (壁効果無)

図-8 指数 m と空隙率の関係



(a) $\Phi 15\text{cm}$ 円柱供試体 (壁効果有)



(b) $\phi 10\text{cm}$ コア供試体 (壁効果無)

図-9 非線形透水係数 k' と空隙率の関係

れが生じていない等の条件を仮定し、空隙率が小さい場合にも連続空隙が存在することを想定している。

図-11 は、式(8)に示すダルシー則を仮定した場合に従来から用いられてきた透水係数の算定式²⁾により算出した透水係数と空隙率の関係を示す。

$$K_T = \frac{H}{h} \times \frac{Q}{A \times (t_2 - t_1)} \quad (8)$$

ここに、 K_T : $T^\circ\text{C}$ における透水係数(cm/s)、 H : 供試体の高さ(cm)、 Q : 時刻 t_1 から t_2 までの越流量(cm^3)、 h : 水位差(cm)、 $t_2 - t_1$: 測定時間(s)、 A : 透水円筒の断面積(cm^2)

図-11 より、式(8)を適用すると本来は曲線的な流速と動水勾配の関係を線形で近似するため、動水勾配ごとに異なる透水係数が算出され、空隙率との関係はかなりばらついたものとなることが分かる。

一方で、式(1)、(3)に示すような非線形透水係数を用いた定量化手法は、試験条件として設定される動水勾配(水位差および供試体高さ)によらず、一定の係数が得られることから、より高精度かつ実用的な評価方法であるといえる。

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、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い、以下の知見を得た。

- (1) 本実験の範囲では、設計空隙率が小さいほど、平均の空隙率に及ぼす壁効果の影響は大きい。
- (2) 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ような曲線となる。
- (3) 6号砕石を用いた場合には、2mm厚の発泡ポリエチレンシートを供試体側面に圧着させることで、壁効果の影響を除去することができる。
- (4) 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、空隙率のみによって推定できる式を提案した。
- (5) 非線形の透水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、一定の係数を測定することができる。

以上の結論は、供試体高さ5~20cm、水位差1~10cm、粗骨材種類が6号砕石の条件下でのものであり、今後、粗骨材の粒径を変化させるなど、さらに広範囲な条件での評価が必要である。

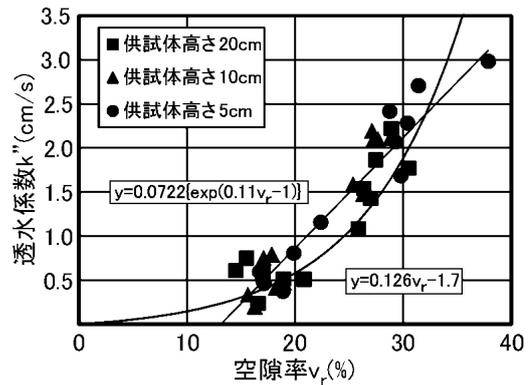


図-10 透水係数 K' と空隙率 (%) の関係

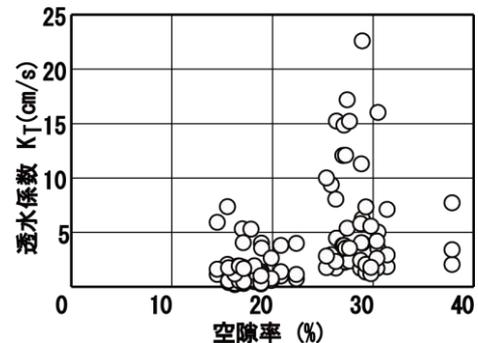


図-11 従来の透水係数 K_T と空隙率 (%) の関係

謝辞

本研究を遂行するにあたり、内田寿久氏(三重大学大学院大学院生)および松平勘太郎君(三重大学卒業生)のご助力を得た。本研究費の一部は、科学研究費基盤研究(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) 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) 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
- 4) 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
- 5) 石田哲朗: 地盤工学入門, インデックス出版, pp.93-109, 2011