

# 論文 ポーラスコンクリートの非線形透水挙動のモデル化と街区からの排水シミュレーション

関本 亮太\*1・松岡 卓\*1・三島 直生\*2・畑中 重光\*3

**要旨:** ポーラスコンクリート内を流れる水の速度と動水勾配の関係は、ダルシー則では表示できず、累乗関数を用いた非線形の関係で表されることが指摘されており、累乗指数  $m$  の値も既にいくつか報告されている。本研究では、累乗指数  $m$  の値を 0.5 に固定し、空隙率と粗骨材粒径の影響を反映した非線形透水モデルを構築した。また、水平方向の浸潤面を持つ POC 内の水の流れに対する同モデルの適用性を確認するとともに、同モデルを用いて、豪雨時における街区レベルの排水シミュレーションを行い、ポーラスコンクリート舗装を適用することで期待できる街区からの雨水の流出遅延効果を確認した。

**キーワード:** ポーラスコンクリート, 透水係数, 累乗関数, 非線形透水挙動, 排水シミュレーション

## 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特徴があり、透・排水、通気などの機能を有している。特に透・排水性に関しては舗装への利用が注目されており、POC 内部での雨水の貯留や、流出速度の低減が可能のため、舗装上の水たまりを防ぐだけでなく、流出速度を調整し、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期待されている。

POC を集中豪雨対策に応用するためには、透水性能の定量化が不可欠である。現在、POC の透水試験方法としては、飽和状態における定水位透水試験方法（案）<sup>1)</sup>が日本コンクリート工学会（以下、JCI と略記）により示されている。同試験方法では、式(1)のダルシー則（流速と動水勾配の関係は線形と仮定）が成立するとして、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)<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。

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

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

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

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および累乗指数 ( $m=1$  のとき  $k'=k_T$ )

図-1 に POC の流速と動水勾配の関係の例を示す。図-1 は、POC の流速と動水勾配の関係を式(1)で近似した結果（破線）と式(3)で近似した結果（実線）を比較したものである。動水勾配を 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

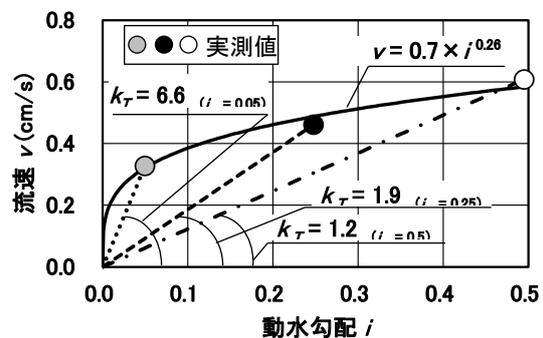


図-1 流速と動水勾配の関係の例  
 (6号砕石, 空隙率 15%)<sup>5)</sup>

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 つ定まる。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関係は線形ではないことが示されている。また夏目ら<sup>5)</sup>の報告では、流速と動水勾配の関係が、式(3)に示すような累乗関数で近似されることを確認し、平均骨材粒径と空隙率から係数  $k'$  および累乗指数  $m$  (以下、指数  $m$ ) を推定する透水モデルを構築している。

ここで、式(3)における指数  $m$  は実験定数であり、夏目ら<sup>5)</sup>は、 $m=0.39$ 、松岡ら<sup>6)</sup>は、 $m=0.44$  と報告している。また、畑中ら<sup>7)</sup>はこれらの係数および指数間の関係を明らかにし、原田ら<sup>8)</sup>は、POC を模したガラスビーズで実験を行い、粒径の変化による非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数  $k'$  と指数  $m$  の関係について報告している。この様に指数  $m$  の値は既往の報告ごとに異なる値が提案されており、どの値を用いるべきか判断し難い

\*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻・大学院生 (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 (正会員)  
 \*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻・教授 (正会員)

表-1 既報<sup>5), 6)</sup>の測定条件

	夏目ら <sup>5)</sup>	松岡ら <sup>6)</sup>
骨材粒形	5号, 6号, 7号	5号, <u>6号</u> , 7号
空隙率(%)	15, 25, 35*	15, <u>25</u> , 35
動水勾配	0.03~2.22	0.05~1
壁効果の有無	有, 無	有, 無

[注]     : 基準となる水準, \*: 5号と7号のみ

状況となっている。そこで本報では、既報<sup>5), 6)</sup>の実験結果を参考に、妥当と考えられる指数  $m$  の値を決定し、累乗関数を用いた非線形透水モデルの汎用性の拡大を目指す。また、非線形透水モデルの応用として、簡易な排水シミュレーションを試みた。

## 2. 累乗関数における指数 $m$ の設定

既報<sup>5), 6)</sup>では、JCI の研究委員会で提案した定水位透水試験に準拠し、それぞれ表-1 の条件で実験を行っている。ここでは、参考にした実験結果の内、壁効果無しの実験結果のみを採用した。

図-2 に、既報<sup>5), 6)</sup>における指数  $m$  と空隙率の関係を示す。なお、図-2 において、実験結果をそれぞれ、文献番号で夏目らを<sup>5)</sup>、松岡らを<sup>6)</sup>として凡例に表示している。また、夏目らは、供試体高さを 20, 10, 5 (cm) としていたが、供試体高さによる影響が不明なこと、および供試体高さ 20cm が広く用いられていることから、ここでは 20cm の値のみを用いた。

図-2 によれば、空隙率および骨材粒径と指数  $m$  の間に相関はみられず、 $m$  は概ね 0.3~0.6 の範囲 (図中の斜線部) に分布しており、それらの平均値は 0.45 となった。原田ら<sup>8)</sup>によれば、ガラスビーズの実験において、粒径が 1.1mm 以上の場合に流れが乱流に遷移し、粒径 1.1mm 以上では  $m$  は 0.6 以下になるとしている。また、管路路における平均流速などをもとめるマンニング式やシェージー式の場合、平均流速は動水勾配の 1/2 乗に比例するとしている<sup>9)</sup>。以上より、本報では指数  $m$  を 0.5 と仮定し、式(5)を採用することとした。

$$v = k'_{(m=0.5)} \cdot i^{0.5} \quad (5)$$

ここに、 $v$ : 流速(cm/s),  $k'_{(m=0.5)}$ :  $m=0.5$  における非線形の透水挙動を累乗関数で近似した時の係数および (以下、係数 $k'_{(m=0.5)}$ ) ;  $i$ : 動水勾配

図-3 に、最小二乗法により近似した、流速と動水勾配の関係における式(3)と式(5)の比較の例を示す。同図は、松岡ら<sup>6)</sup>の 6号砕石・空隙率 25% における実験結果の例であるが、 $m$  を 0.5 に変化させたことによる顕著な差はみられず、式(5)が適用可能であると判断できる。

また、図-4 に $k'_{(m=0.5)}$ と $k'$ の関係を示す。 $m$  を 0.5 に変化させたことによる係数 $k'_{(m=0.5)}$ への影響は、平均で

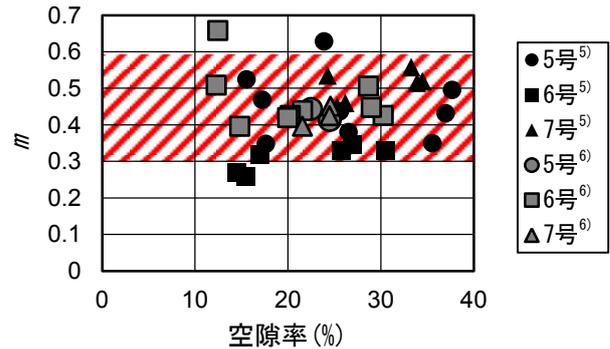


図-2 既報<sup>5), 6)</sup>における空隙率と指数  $m$  の関係

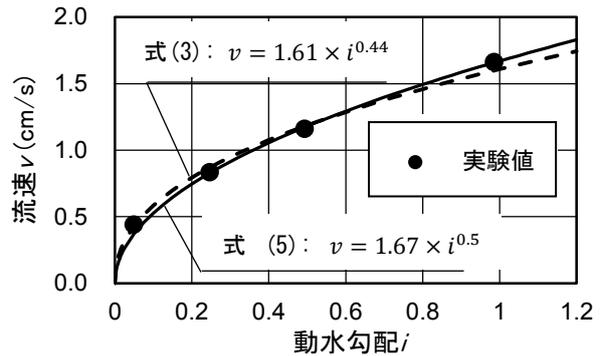


図-3 式(3)と式(5)の比較例  
(6号砕石, 空隙率 25%)<sup>6)</sup>

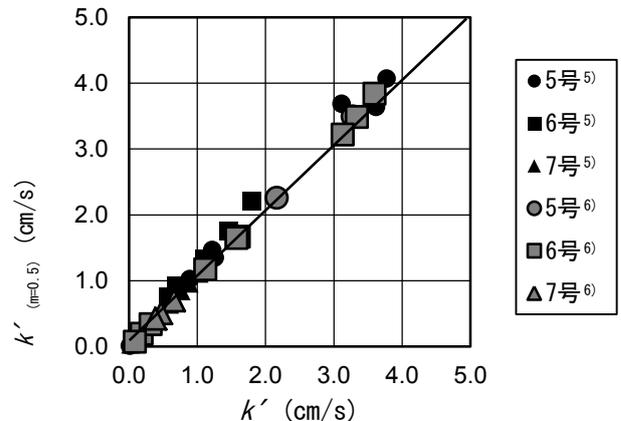


図-4 指数  $m$  を 0.5 とした  $k'_{(m=0.5)}$  と指数  $m$  を最適値としたときの  $k'$  との関係

4%程度、最大でも 30%程度の差であった。

図-5(a)~(c)に、 $k'_{(m=0.5)}$ と空隙率の関係を骨材粒径ごとに示す。 $k'_{(m=0.5)}$ と空隙率にはばらつきはあるものの強い相関関係があり、図-5に示した線形近似式より、式(6)の近似式が得られた。ここで、夏目ら<sup>5)</sup>の報告によれば、POC にはほとんど透水しなくなる空隙率があり、その平均値はおおよそ 13%である。そのため、図-5における空隙率軸切片は 13%とした。

$$k'_{(m=0.5)} = a \cdot V_R - b \quad (6)$$

$$a = 0.0077\overline{\varphi a} + 0.042$$

$$b = -0.1\overline{\varphi a} - 0.49$$

ここに、 $V_R$ : 空隙率(%),  $\overline{\varphi a}$ : 平均骨材粒径(mm)

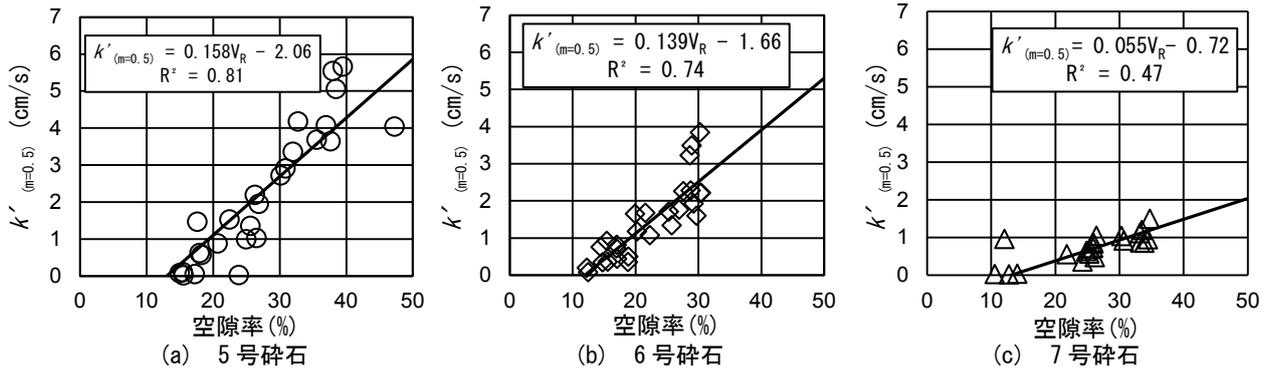


図-5  $k'_{(m=0.5)}$  と空隙率の関係

### 3. 水平方向透水試験に基づく係数 $k'_{(m=0.5)}$

#### 3.1 係数 $k'_{(m=0.5)}$ の算出方法

既報<sup>11)</sup>では、POC内を水平方向に流れる浸潤面を持つ水の挙動に関し、透水係数の算出するため、式(7)に示すデュプイの式<sup>10)</sup>を用いた。しかし、水平方向透水試験において、水槽からPOCへ注水する際の注水面の水位  $H_1$  の値が不安定になるなどにより、ばらつきが大きく、適用性については不明確な点もあった。

$$Q = \frac{kB}{2L}(H_1^2 - H_2^2) \quad (7)$$

ここに、 $Q$ ：流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ )、 $k$ ：透水係数( $\text{cm}/\text{s}$ )、 $B$ ：供試体幅( $\text{cm}$ )、 $L$ ：供試体長さ( $\text{cm}$ )、 $H_1$ 、 $H_2$ ：上流端、下流端の水位

文献<sup>12)</sup>、<sup>13)</sup>によれば、デュプイの近似仮定を用いれば、式(8)が成立する。すなわち、図-6における各点の水位差を各点間の距離で割ることで、動水勾配  $i$  を算出可能であり、これと定水位透水試験の結果から得られた各点の流速  $v$  を式(5)の非線形透水モデルに適用すれば係数  $k'_{(m=0.5)}$  が算出できることになる。

$$i_j = \frac{H_{j-1} - H_j}{X_j} \quad (8)$$

ここに、 $i_j$ ： $j$ 番目の動水勾配、 $H_j$ ： $j$ 番目の水位( $\text{cm}$ )、 $X_j$ ：各点の距離( $\text{cm}$ )

本報では、筆者らが報告した水平方向透水試験の結果<sup>11)</sup>を参考に、係数  $k'_{(m=0.5)}$  を算出した。

#### 3.2 算出結果と考察

文献<sup>11)</sup>では、表-2のような要因水準で実験を行い、POC側面において、POCを長さ方向に4等分する位置に3本のマンメータチューブを取り付け、上流端および下流端と合わせ、合計5か所の水位を測定している。

図-7に、注水面の水位200mmにおける各供試体の水位を示す。同図によれば、6号碎石・空隙率15%の供試体を除き、浸潤面は概ね同様の水位となっている。

測定した水位をもとに、式(8)を用いて動水勾配を算出し、式(5)により近似することで、POC中の水の水平方向

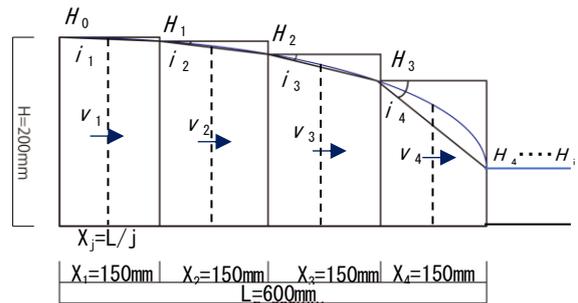


図-6 水平方向における動水勾配

表-2 既報<sup>11)</sup>における要因と水準

要因	水準
骨材粒径	5号, 6号, 7号
空隙率(%)	15, 25, 35%
供試体長さ(mm)	300, 600, 1200
注水面の水位(mm)	50, 100, 150, 200

—：基準となる水準

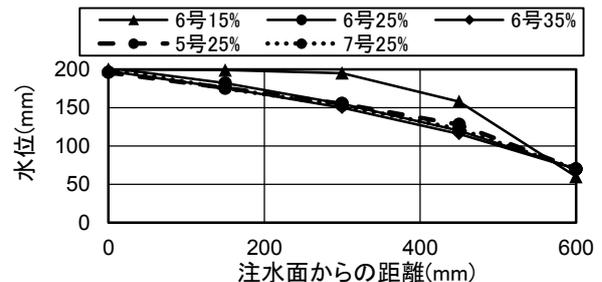


図-7 注水面の水位200mmにおける各供試体の水位

流動における係数  $k'_{(m=0.5)}$  を算出した。流速と動水勾配の関係について6号碎石・空隙率25%の例を図-8に示す。ここで、同水準の水平方向透水試験における動水勾配の範囲は0.02~0.32となったが、他の水準も含めた場合の動水勾配は0.006~0.6である。また、流速  $v$  に関しては、水位を測定した各点の中間の断面における流速を使用した(図-6参照)。なお、図中には比較のため、定水位透水試験の結果<sup>6)</sup>を併示する。ここで、凡例の1~3の数字は、試験体番号であり、空隙率は概ね一定であったため、ばらつきは、誤差の範囲であると考えられる。

図-8によれば、水平方向透水試験における流速と動

水勾配の関係、および定水位透水試験における流速と動水勾配の関係は、ばらつきはあるが、定水位の測定結果の内側に水平方向の結果が存在しており、概ね同一のもののみならずことが可能である。また、水平方向透水試験における動水勾配は、既報<sup>6)</sup>で実験条件として設定した動水勾配と比べ、非常に小さい値をもとることが確認できた。

図-9に、平均骨材粒径および空隙率と係数 $k'_{(m=0.5)}$ の関係を示す。また、同図には、式(6)により求めた推定値も併示する。図-9(a)によれば、係数 $k'_{(m=0.5)}$ は平均骨材粒径が大きくなるにつれ増加し、粒径が大きくなると、定水位透水試験における係数 $k'_{(m=0.5)}$ の方が、水平方向透水試験におけるそれと比べ、若干大きくなる傾向がある。図-9(b)によれば、係数 $k'_{(m=0.5)}$ は空隙率が大きくなるにつれて増加し、どの空隙率でも、定水位透水試験における係数 $k'_{(m=0.5)}$ の方が、水平方向透水試験におけるそれと比べ、若干大きくなっている。

以上から、若干のばらつきはあるが、2章で示したPOCの非線形透水モデルは、水平方向の浸潤面を持つ水の流れに対しても適用可能であると考えられる。

#### 4. 街区からの排水シミュレーション

##### 4.1 計算方法

3章までの結果から、POCの非線形透水モデルを構築し、水平方向の浸潤面を持つ水の流れに適用できることが明らかとなった。そこで、POCの非線形透水モデルを用いた街区レベルの排水シミュレーションを試みる。これまで、POCはその特性から集中豪雨対策として利用が期待されてきたが、その効果を実際に検討した事例は少ない。POCによる流出解析を行った研究として、原田ら<sup>14)</sup>の研究があるが、今後のPOC舗装の実用化のため、より簡易的な計算方法が望まれる。

そのため、本研究では、仮想の小区画(100×100m)を対象として、POC舗装を適用した場合に、アスファルト舗装やコンクリート舗装と比較し、どの程度の流出抑制効果が期待できるかについて、POCの諸特性を考慮した表計算ソフトによる数値シミュレーション<sup>15)</sup>を用いて検討する。区画の概要を図-10に示す。計算の条件として、排水地点の排水は無限に行えるものとした。POCの流速は、POCの厚さによらず一定とし、勾配が小さいため、水は等流的(水面と斜面は平行)に流れるものと仮定した。

シミュレーションの方法は、区画を100個のブロックに分割し、各ブロックから流れてくる水を排水地点で集計するものであり、各ブロックの水は一つのまとまりとして仮定している。

図-11に、シミュレーションおよび排水曲線の計算フ

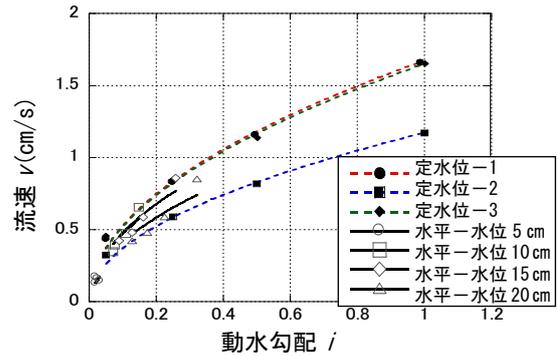
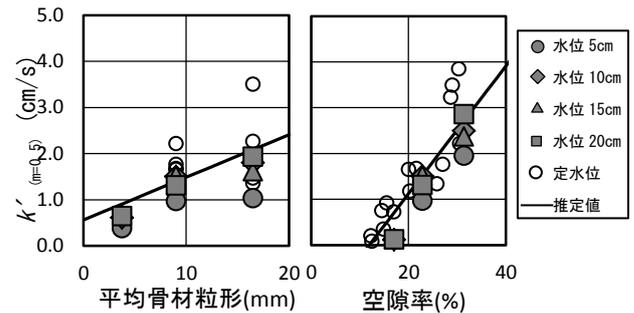


図-8 流速と動水勾配の関係(6号砕石・空隙率25%)



(a) 平均骨材粒径の影響 (空隙率25%) (b) 空隙率の影響 (6号砕石)

図-9 平均骨材粒径および空隙率と $k'_{(m=0.5)}$ 関係

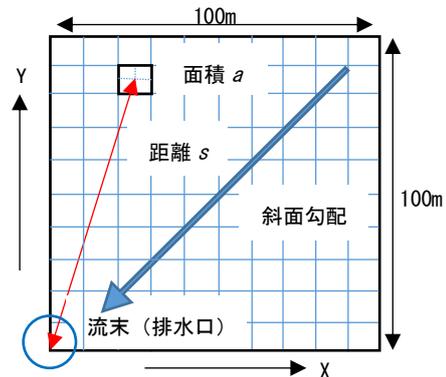


図-10 区画の概要

ローを示す。

なお、係数 $k'_{(m=0.5)}$ は提案式(6)により算出し、アスファルト舗装における流速の算出には、マンニング式(9)を用いた。その際に粗度係数は、 $n=0.013$ とした。径深については、ほぼ水位と等しくなる。降雨条件を100mm/hとしているため、分刻みでは1.67mm/minとなり、1分あたりの区画内の水位は0.00167mとなる。そのため、 $R=0.002$ として計算を行った。

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

ここで、 $n$ :粗度係数、 $R$ :径深(m)、 $R=A/S$ 、 $A$ :流積(m<sup>2</sup>)、 $S$ :潤辺(m)

また、式(6)により算出した係数 $k'_{(m=0.5)}$ は壁効果の影響を含んでいない。実際の舗装では、底面部が壁効果の影響を受けると考えられるため、ここでは、文献<sup>11)</sup>の結

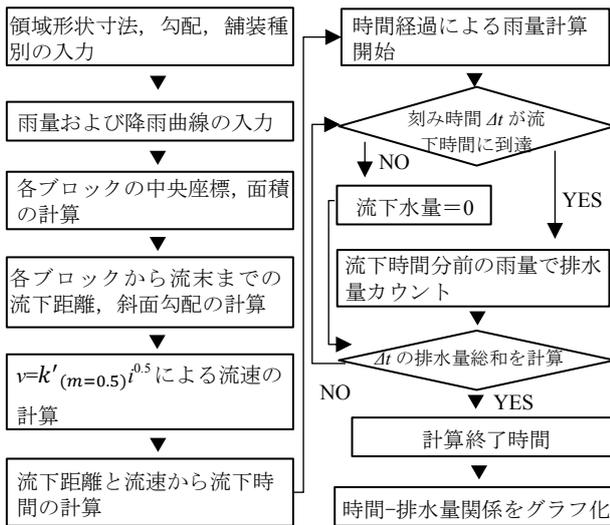


図-11 計算のフロー

表-3 要因と水準

要因	水準
舗装種別	アスファルト, POC
POCの骨材粒径	5号, 6号, 7号
POCの空隙率(%)	15, 25, 35
勾配	0.01, 0.03, 0.06
降雨曲線	定常, 正弦波

[注] — : 基準となる水準,

果より, 骨材粒径と空隙率ごとに壁効果なしの流速を2.1~4.4倍することで対応した。

表-3にシミュレーションの要因と水準を示す。勾配は, 図-10に示すX方向, Y方向にそれぞれ同じ傾きを与えており, 最高点は排水地点の対角の点である。降雨条件として, 定常降雨と正弦波降雨を取り挙げ, 定常降雨は, 100mm/h, 正弦波降雨の場合は, 2時間で1周期, 100mm/h相当とした。定常降雨と正弦波降雨で降雨条件が異なるため, 本報では降雨条件間でのシミュレーション結果の比較は行わない。

#### 4.2 計算結果

図-12に, 定常降雨時の時間-流出水量関係に及ぼす舗装種別の影響を示す。図-12によれば, 流出水量が定常状態になるまでの時間を比較すると, アスファルト舗装と比べ, POCの骨材粒径ごとに, 5号砕石では, 100min程度, 6号砕石では, 200min程度, 7号砕石では, 550min程度, それぞれ流出遅延効果があることが確認できた。ここで, 原田ら<sup>14)</sup>は, POCの透水係数 $k=1.0\text{cm/s}$ , 有効空隙率 $n_e=0.3$ , 降雨強度 $r=100\text{mm/h}$ の条件で, 計算した結果, 不透水層と比較して, ある程度の流出抑制効果があるとしている。また, 中川ら<sup>15)</sup>は, 6号砕石, 空隙率30%の条件で, 60min程度の排水遅延効果があるとしている。中川らと比較して, 約3倍程度の差が生じているが, この要因として, 流速の計算の段階で, 中川らは,

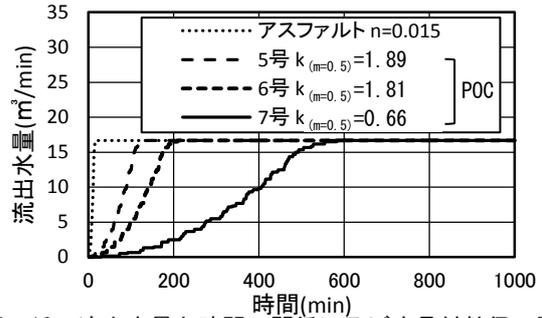


図-12 流出水量と時間の関係に及ぼす骨材粒径の影響 (空隙率25%、勾配0.03、定常降雨)

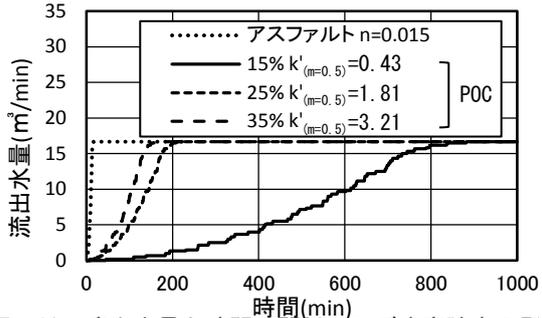


図-13 流出水量と時間の関係に及ぼす空隙率の影響 (骨材粒径6号、勾配0.03、定常降雨)

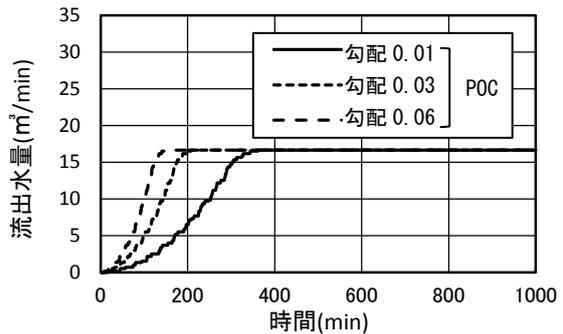


図-14 流出水量と時間の関係に及ぼす勾配の影響 (空隙率25%、骨材粒径6号、定常降雨)

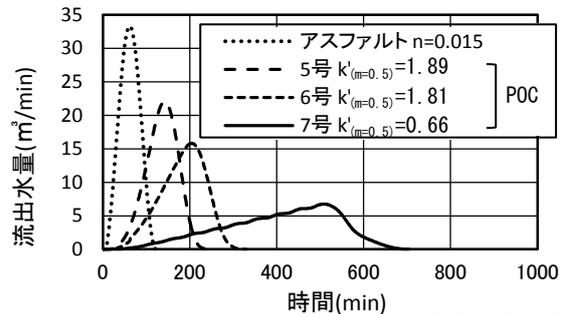


図-15 正弦波降雨における流出水量と時間の関係 (空隙率25%、勾配0.03、正弦波降雨)

マンニング式により, 経験的にPOCの流速を推定しているのに対し, 筆者らは, 非線形透水モデルにより, 推定していることが原因であると考えられる。また, 流出遅延時間の違いに関し, 流速の推定に際して, 浸潤面を持つ水は, 排水面に近づくにつれ流速が速くなり, 排水面近くの流速を採用している場合, 流速が過大に評価されて

いることが考えられる。

図-13に、定常降雨時の時間-流出水量関係に及ぼすPOCの空隙率の影響を示す。図-13によれば、空隙率15%の場合の流出時間が非常に遅くなっていることが分かる。流出時間に影響する要因として考えられるのは、主に式(6)により算出される係数 $k'(m=0.5)$ の違いであり、また、壁効果の影響も流出時間に差を生じる一因と考えられる。

図-14に、定常降雨時の時間-流出水量関係に及ぼす(地盤)勾配の影響を示す。図-14によれば、勾配が小さくなるほど流出時間は遅くなることが分かる。実際の街区では、勾配は非常に小さいことが多く、POC舗装を用いた場合の流出遅延効果も大きく影響を受けると考えられる。

図-15に、正弦波降雨時の時間-流出水量関係に及ぼす舗装種類の影響を示す。正弦波降雨の場合、POC舗装によって、流出遅延と排水のピークを低減する効果があることが分かる。特に7号砕石は、450分程度の遅延効果と、80%程度のピーク低減が確認できた。しかし、本計算条件は、無限に排水可能としており、実際には、溢流の発生などにより、異なる結果となることも想定されるため、今後より詳細な検討が必要である。

## 5. まとめ

本報では、累乗関数を用いたPOCの非線形透水モデルにおける累乗指数 $m$ の値の設定、および水平方向透水挙動の推定への応用を試み、更に、POCの非線形透水モデルを用いた排水シミュレーションを行った。その結果から、得られた知見を以下に示す。

- (1) 既報で提案された累乗関数によるPOCの非線形透水モデルにおける累乗指数 $m$ を0.5と定め、その妥当性を確認した。
- (2) 定水位透水試験結果に基づいて定量化したPOCの非線形透水モデルは、浸潤面を持つ水平方向の水流に適用できることを示した。
- (3) POCの非線形透水モデルを用いて、街区レベルの排水シミュレーションを行った結果、POCの流出遅延効果が確認され、正弦波降雨の場合は、さらにピーク時の流出水量が低減されることが明らかとなった。

## 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)および、中川武志氏(株式会社ファイナルマーケット)のご助力を得た。また、本研究費の一部は科学研究費補助金 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る。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会: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に関する研究委員会報告書, pp336-339, 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
- 6) 松岡卓, 関本亮太, 三島直生, 畑中重光: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, コンクリート工学年次論文集 Vol.38, No.1, pp.1749-1754, 2016
- 7) 畑中重光, 三島直生, 夏目実穂: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, コンクリート工学年次論文集 Vol.37, No.1, pp.1381-1386, 2015
- 8) 原田守博, 渡邊英典, 畑中重光, 三島直生:POCを想定した粗粒媒体における非線形ダルシー則に関する透水実験, 平成26年度土木学会中部支部研究発表会概要集, II-31, pp.141-142, 2016.2
- 9) 川合茂, 和田清, 神田佳一, 鈴木正人:河川工学, コロナ社, pp55-57, 2002
- 10) 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
- 11) 関本亮太, 松岡卓, 三島直生, 畑中重光:ポーラスコンクリートの水平方向透水性能に及ぼす壁効果の影響と内部の水の流速分布に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.38, No.1, pp.1743-1748, 2016
- 12) 山口柏樹:土質力学(全改訂), 技報堂出版, pp53-64, 1984
- 13) 松岡元:土質力学, 森北出版, pp32-53, 1999
- 14) 原田守博, 夏目実穂, 三島直生, 畑中重光:ポーラスコンクリート舗装による雨水除去・流出抑制効果に関する基礎的検討, 土木学会論文集 B1(水工学), 71(4), I319-I324, 2015
- 15) 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.205-208, 2013.