

ポーラスコンクリートの雨水流出過程における不飽和浸透の役割

いであ(株) 渡辺尚輝

1. はじめに

近年、流域の都市化に伴い不浸透域が拡大している。また、局地的豪雨が頻繁に起きているため、雨水の流出を抑制することが課題となっている。流域における流出抑制方策の一つとして、ポーラスコンクリート(以下 POC と呼ぶ)舗装が注目されている。POC 舗装は内部に多数の空隙をもつことにより、通常の舗装に比べ透水性に優れている。POC 舗装の多くの実用化のためには、POC の浸透貯留能力の評価が必要になる。しかし、現地で人工的に降雨を与えて浸透流出過程を確認することは困難であるため、水理解析にて確認する必要がある。

水理解析モデルを作成するにあたり、M 大学に設置してある POC 実験槽を使用し、降雨装置を用いて実際に POC 舗装に降雨を与えた場合の浸透流出過程を実験により確認した。また流れの基礎方程式を用いて POC における水平方向の浸透流の解析結果と比較した。それにより、流出開始時において差異が生じたため、不飽和浸透解析によりその原因を追究した。

2. POC 槽における雨水流出実験と浸透解析

実験には M 大学に設置されている大型 POC 実験槽を使用した(図-1)。POC 槽は長さ 4.18m×幅 0.9m×層厚 0.4m であり、6 号砕石を用いて水平基盤上に製作されている。POC 全体に降雨を与えるため人工降雨装置を設置した。装置は 16 個のノズルから水を霧状に噴出させる構造とした。POC 槽からの流出流量は、下流端に受水板を設けて集水し、三角堰を用いて測定した。三角堰は測定精度を高めるため 20° の鋭角とし、静電容量式水位計で越流水深を測定した。

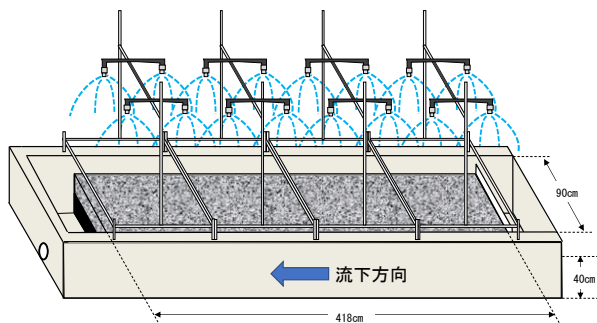


図-1 雨水流出実験装置概要図

POC 槽の水理条件として、上流端に高さ 0.5m の止水壁を設置して不透水条件とし、下流端には高さ 0.2m の止水壁を設置、槽全体の初期水深を 0.2m として降雨の浸透水を越流流出させる形式とした。POC 槽からの流出流量を図-2 に示す。

浸透解析には飽和領域の水平次元を対象とし、降雨は瞬時に浸透し水面に供給されると仮定した。また、粗粒媒体における浸透流は乱流となり、浸透流束は非線形透水則 $q=k \cdot i^m$ で表されるものとする、基礎方程式は(1)式で表される。

$$n_e \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k k' \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 \right)^m \right\} \quad (1)$$

ここに、 n_e : POC 槽の有効空隙率、 h : 浸透流の水深、 k' 、 m : 非線形透水則に係わる係数、 S_0 : 基盤の x 方向勾配 (> 0)、 r : 降雨強度である。

解析にあたり、POC 槽の状況に合わせて $k'=7.0\text{cm/s}$ 、 $m=0.50$ 、 $n_e=0.25$ 、 $S_0=0.0$ と設定し、実験時と同様の降雨を与えて求めた流出流量を図-2 に示す。

両者を比較すると、降雨開始から 400 秒以降は比較的良好な再現性を示している。一方で、降雨開始時に着目すると、解析値は降雨を与えるとすぐに流量の増加が始まるのに対し、実験値は流出開始までに 60 秒を要した。解析において、POC の空隙の大きさゆえに与えた降雨は瞬時に浸透し、内部の水面に到達すると考えていた。しかし、POC 内部を浸透するのに時間がかかっていることが予想される。そのため、不飽和浸透解析を行うことで、POC 槽の内部の浸透過程を確認し、雨水が内部水面に達する供給量を求める必要がある。

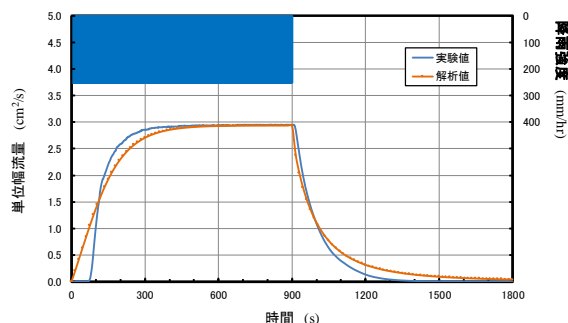


図-2 実験値と解析値の雨水流出ハイドログラフ

3. POCの不飽和浸透解析

不飽和浸透解析を行うにあたり、流れを定式化して解く必要がある。不飽和領域の浸透流には質量保存則と運動方程式により導かれる、基礎方程式を用いる。粗粒媒体において飽和流の場合、浸透流束を非線形ダルシー則で表しており、これを不飽和領域の流れにおいても同様に適用する。ここで、POC表面から下向きを正として鉛直一次元を対象とすると以下の基礎方程式が得られる²⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left\{ \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} + 1 \right\}^m \right] \quad (2)$$

ここに、 θ : 体積含水率, $k(\theta)$: 不飽和透水係数, $\psi(\theta)$: 吸引圧水頭, m : 非線形ダルシー則に関する定数である。数値計算は上式を差分展開し、陽解法によって行う。

解析について、粗粒媒体における不飽和浸透の基礎方程式と水分特性を表す Brooks-Corey モデルを用いた。解析の条件は POC 表面から下向きを正として鉛直一次元を対象とし、定常的に設定降雨 250(mm/hr)が POC 表面に与えられるものとする。解析に用いるパラメータは POC 実験槽の状態や水分特性を表す水分特性曲線などを参考に範囲を定め、その範囲のもと実験結果の流出開始時間 60 秒を再現するように設定した。具体的には飽和体積含水率 θ_s は M 大学の実験槽の設計空隙率は 25%であるため、それよりも大きくなるのが予想され $\theta_s=0.29$, POC は粗大空隙をもつため水分を保持する力が弱いことや透水性が非常に優れると考え、最小含水量 θ_r , 飽和透水係数 k_s , 限界吸引圧水頭 ψ_b はそれぞれ $\theta_r=0.08$, $k_s=7.0(\text{cm/s})$, $\psi_b=-0.5(\text{cm})$, 水分特性曲線の傾きから Brooks-Corey モデルのパラメータ $\lambda=3.0$ として妥当な値を用いた。そこで不飽和領域の水分量の変化と水面を通過するフラックスを計算した。

解析結果として各節点における水分量の鉛直分布を図-3に示す。水分量が大きく変化する点において浸潤前線が現れ、降雨がどのくらい浸透しているかを示す。浸潤前線は比較的急な形状を示し、少しの深度変化により水分量が大きく変化している。このことから式(2)における圧力項の影響が一部分のみとなり、重力項による影響が強いことが考えられる。図-4に水面を通過するフラックスの時間的変化を示す。グラフの形状は 60 秒の時フラックスが急激に上昇することから、その時点で降雨が水面に到達したと考えられる。不飽和浸透解析を行ったところ不飽和領域の浸透に時間がかかり、POC の浸透流出過程を考える上で詳細に実験結果を再現するためには不飽和領域の浸透を考慮しなければならないことが分かった。

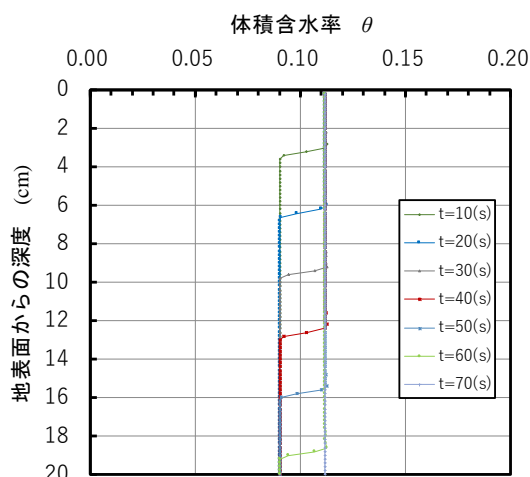


図-3 水分量の鉛直分布

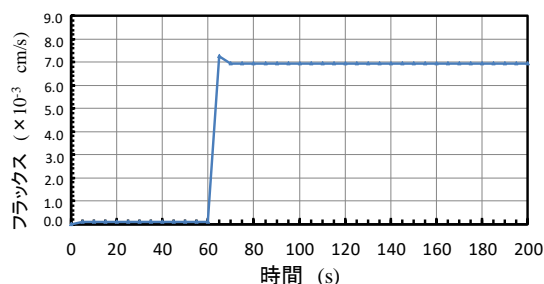


図-4 内部水面を通過するフラックス

4. おわりに

本研究では、粗粒媒体における非線形透水則に基づく不飽和浸透解析を行った。その結果、実験結果の流出開始時間を再現することができ、POC のような粗大空隙をもつ媒体であっても、浸透に時間がかかった。そのため、雨水流出過程をより詳細に再現するためには不飽和浸透領域の浸透を考慮する必要があることが分かった。今後は、POC への供給量を不飽和浸透により考慮することで詳細に浸透流出過程を再現しなければならない。また、POC の雨水流出現象を実用的に解析するためにも、浸透特性等を把握することでモデルの簡易化を図ることを課題とする。

参考文献

- 1) 原田守博・渡邊英典：粗粒媒体における非線形透水則に関する考察，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.73，No.4，I_43-I_48，2017.
- 2) William Jury・Robert Horton：土壤物理学，築地書館，pp.102-105，2004.