■ 研究論文

定常排水時の植栽排水層の機能

Function on Draining Layer for Planting at Steady State

井本由香利* 李 善勲* 雨宮 悠*
Yukari IMOTO Sunhoon LEE Yu AMEMIYA

摘要：本論文では、降雨により湛水が生じ、定常流れを生じた際の排水層機能を数値実験により調べ、基盤設計の指針とすることを試みた。その結果、雨量強度増加による湛水深の増加割合は大きく、排水層厚を増加させてもあまり影響せず、むしろ植栽層厚が大きく影響することが理解された。さらに、湛水形成の限界降雨強度は計算例の場合、9.0mm/hr 以上となり、植栽層厚に依存するが排水層厚の割合を増やすと大きくなる。すなわち、排水効果が期待できる。また、両層境界における全ポテンシャルは、計算に用いた水理特性では排水層厚 50mm 以下で 0 に近い値に固定され、その場合、降雨強度と形成湛水深の関係が近似的に与えられることを示した。

キーワード：植栽土層、排水、ダルシー則、数値解析、透水係数

1. 緒言

植栽基盤下部に、過剰な水分を排除する目的で排水層を敷設する例が多い。しかし、本層の機能について現状では十分な検討がなされ、設計に供されているとは言いがたい。そこで、本論では、本層の排水機能に関する数理解析を実施し、排水層の設計根拠を与えることを目的とした。数理解析を用いる理由は、非定常な過程を含む数多くの層の組み合わせという想定と確率的である水文環境要因に対してすべて実実験で調査することは事実上不可能であるからである。湛水形成に対する排除機能を検討するに当たり、その項目として、(1) 降水がどの程度の湛水を形成し、その状態で排水層は敷設の効果が見込めるか。(2) 形成された湛水がどの程度の時間を要して排除されるかの 2 点の評価が少なくとも必要であろう。本論では、湛水形成に対する排水層の敷設効果を明らかにするために、降雨強度と植栽層厚との関係を数値解析によって究明することを目的とする。

さて、植栽層をとりまく都市水文環境は、設置される地域に依存する。各種都市内水利施設での降雨に対する目標整備基準は 50mm/hr 程度としているが¹⁾、本論ではその 2 倍となる 100mm/hr までを想定して数値解析を行う。さらに、植栽層厚については、公園緑地では 300~1500mm が設計標準であり、屋上では 100~600mm が多用されているので^{2), 3)}、本論では 100~1000mm の層厚を解析対象とした。

2. 試料ならびに方法

(1) 試料

数値実験に用いた試料は、植栽層として首都圏の代表的土壌である火山灰表土（相模原市）および、排水層の粗大間隙材料として粒径 5-10mm のアカダマ土を使用した。試料の水理特性を Fig.1 に、基礎土壌特性を Table 1 に示す^{4), 5), 6)}。

(2) 層構成

植栽層、排水層および不透水性基盤の構成を考え、これらが、何らかの植栽容器または収容構造中に設置されるものとする。これらの容器・構造は場合によっては、排水暗渠等の付帯施設が設計され、その様式には多様である。しかし、本論の課題は土構造そのものの応答であるため、これらの施設によって生じる排水条件の変化を除いた解析を行う。したがって、排水層下部、すなわち不透水性基盤上では、土層よりの排水は問題なく系外に排出されるものとし、その圧力は時間

によって変化せず大気圧に保たれるものとする。

(3) 数値解析

解析すべき条件から仮に植物が植栽されていても、蒸発散解析とは異なり、植物の存在による影響は極めて少ないケースとみなせる。すなわち、降雨下であるので、大気湿度はほぼ 100% に達することが想定され、この間の蒸発散は考えられない。したがって、解析は純粋に土壌内水分の移動解析に基づくだけで充分ということになる。一方、本解析の目的から、与えた降雨強度に対して湛水が生じるか否か、湛

Fig.1 Retentivity and hydraulic conductivity of samples used^{4), 5), 6)}

Table 1 Soil Physical Properties^{4), 5), 6)}

Sample	Density Mg/m ³	Bulk Density Mg/m ³	Saturated hydraulic conductivity ×10 ⁻⁴ kg s/m ³
Sagami-hara volcanic ash	2.46	0.682	2.563
5-10mm crushed crumb	2.741	0.562	5000

*千葉大学大学院自然科学研究科

*Graduate School of Science and Technology, Chiba University

水が生成するとすれば、どの程度の水深となり、そのときの排水層はいかなる機能を果たしているかが調べられればよい。したがって、初期状態は任意であるが、ここでは、重力平衡の条件を与えるものとする。

基礎方程式は、不飽和 Darcy 則に基づく次式で表せる⁷⁾。

$$\rho_L \frac{d\theta}{d\psi_L}(\psi_L) \frac{\partial \psi_L}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_L(\psi_L) \frac{\partial \psi_L}{\partial z} + k_L(\psi_L) g \right] \quad (1)$$

ここに、記号はそれぞれ、 θ : 液相率、 ψ_L : 土壌水分ポテンシャル (J/kg)、 k_L : 透水係数 ($kg \cdot s/m^2$)、 ρ_L : 水分密度 (kg/m^3)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 z : 高さ (m)、 t : 時間 (s) である。 z の原点は排水層下端に設定する。本式を植栽層・排水層の複層問題へ適用する方法は、崔・雨宮の方法⁸⁾と同様である。

さて、全ポテンシャル $\phi = \psi_L + gz$ 、排水層厚 L_1 、植栽層厚 L_2 、下層フラックス f_1 、上層フラックス f_2 、雨量強度 r 、湛水深 H_p とすると、解析条件に合致するように、

初期条件: $t=0$ で、 $\phi(z)=0$ 、すなわち、 $\psi_L = -gz$

下部境界条件: $t>0$, $z=0$ で、 $\psi_L=0$

接合部境界条件: $t>0$, $z=L_1$ で、 $f_1=f_2$

上部境界条件: $t>0$, $z=L_1+L_2$ で、

i) $\psi_L > 0$ のときは、 $\psi_L = gH_p$ 、ただし、 $dH_p/dt = f_1/\rho_L - r$ の関係が満たされるものとする。

ii) $\psi_L < 0$ のときは、 $f_2 = \rho_L r$

とした。数値解析は、(1) 式を差分に開き、visual BASIC でコード化した。上部境界は、異なる形式の境界条件が交互に現れるので、時間推移に応じて解かれた ψ_L の正負によって切替えた。

3. 結果ならびに考察

計算は、与えた降雨強度によって浸潤が生じ、その進行とともに不飽和から飽和へ移行する。やがて、湛水が生じるが、土層の通水能力と雨量強度に応じた一定の水深に定まり、定常状態となる。その遷移の過程を、Fig.2 に土壌水分全ポテンシャル分布変化として示す。全ポテンシャル分布に示されるように初期状態から雨水の浸入が始まり、植栽層の水分が増加する。やがて、浸潤先端は、植栽・排水両層の境界に達すると、そのポテンシャルを増大させつつ、排水層への浸潤が始まる。しかし、排水層の透水係数は不飽和域で極度に小さくなるのが粗粒質材料の特徴なので、植栽層が飽和状態を維持しつつ排水層では不飽和となる。

さて、降雨強度によって定まる定常状態に落ち着くと、全ポテンシャル線は植栽層、排水層ともに直線的な変化を示す。ただし、排水層では直線の切片は 0 を通らないのが特徴となる。すなわち、排水層下端近傍では飽和に近くなり、対応する粗大間隙層の透水係数が極端に大きくなるため、殆どポテンシャルの傾きを必要としないことに対応する。また、両層境界の全ポテンシャルは、 $\phi = gz$ 線近傍に保たれる。一方、植栽層は水分飽和の状態となり、下部排水層は不飽和のままに保たれる特徴を有する。Fig.3 は対応する湛水深の時間変化の代表計算例を示す。一定の降雨強度に応じ、湛水深は S 字型を描きながら定常状態に達する様子が分かる。

降雨強度に応じた定常湛水深の関係は Fig.4, 5, 6, 7 にまとめられる。それぞれ、植栽層厚が 100, 200, 600, 1000mm に対する計算結果を示す。また回帰線は凡例の順番に対応する。植栽層厚に対し、排水層を 0, 1/10, 1/4, 1/2, 1 の層厚として変化させると、生成湛水深は、雨量強度の増加に対し、ほぼ直線的に増加する。降雨強度 50mm/hr では、植栽層厚 100mm で 396~453mm, 200mm で 805~905mm, 600mm で 2700mm 以上, 1000mm で 4515mm 以上の湛水深が計算された。

Fig.2 Change of total potential profile with time at rainfall intensity of 25 mm/hr

Fig.3 Change of ponding depth with time. The dashed line indicates the ponding depth attaining at steady flow state

Fig.4 Relation between rainfall intensity and ponding depth for 100mm planting depth. Subscripts of y indicate draining layer thicknesses

湛水深の増加割合は、1mm/hrの強度増加に対し、植栽層厚100mmの場合は、11mm、以下、200mmで22mm、600mmで66mm、1000mmで110mmとなり、いずれも層厚増加に対し、急激に湛水深を増加させる。しかし、その増加の程度は、排水層厚よりも、植栽層厚に大きく影響されることが理解される。植栽層厚と湛水増加強度の関係は比例関係にあり、植栽層厚1mmの変化に対して0.11mm/(mm/hr)の湛水増加強度変化を示す。この値が植栽層厚増加によって急激な湛水深増加をもたらす原因となっている。

そこで、この物理的内容を調べてみる。湛水が生じる植栽層表面で、現象が定常・飽和になると、 $dH_p/dt=0$ となるので、地表面でのフラックスは、 $f=\rho_L r$ のように表せる。一方、飽和Darcy式より、

$$f = -k_s \nabla \phi$$

であるから、ポテンシャル勾配は、

$$\nabla \phi = -\frac{\rho_L}{k_s} r \quad (2)$$

となる。植栽層は結果的に、すべて飽和であるので、ポテンシャル線は直線となる。すなわち、その勾配は、

$$\nabla \phi = g \frac{H_p + L_2 - h_1}{L_2} \quad (3)$$

と表せる。ここに h_1 は境界ポテンシャルの水頭表示値である。すなわち、 $\psi_L = gh_1$ である。両者が等しいことから、生成湛水深と降雨強度の関係は、

$$H_p = -\frac{\rho_L L_2}{k_s g} r + h_1 - L_2 \quad (4)$$

と与えられる。しかし、 h_1 は雨量強度 r の関数であるため、生成湛水深は直線関係とならない。(4) 式の r に関する微分は、

$$\frac{dH_p}{dr} = -\frac{\rho_L L_2}{k_s g} + \frac{dh_1}{dr} \quad (5)$$

であるが、右辺第1項を数値解析に与えた諸値により計算すると、 $0.11\text{mm}/(\text{mm}/\text{hr}) \times L_2$ であり、数値部分は、回帰分析結果とほぼ一致する。すなわち、(5)式第2項は未知であるが、その寄与は殆ど無視できることになる。したがって、 $0.11\text{mm}/(\text{mm}/\text{hr})$ の物理的意味は、 $\rho_L/(k_s g)$ であると言える。

Fig.8 に一定の降雨強度下での排水層厚と定常湛水深の関係の一例を示す(植栽層厚100mm)。層厚の増加の割には、湛水深はそれほど減少せず、層厚0mmすなわち植栽層単独の場合であっても僅かに大きい程度である。層厚が増すほど湛水深の変化が相対的になくなるので、したがって、この面からは、排水層を敷設する効果が少ないこととなる。

一方、Fig.4, 5, 6, 7の直線が x 軸と交差する強度は、湛水が生じるか否かの限界雨量強度となる。同一の植栽層厚に対し、排水層増加に応じてこの限界値は増加してゆく。降雨強度0~100mm/hrの範囲で、植栽層厚100mmの場合は、9.0~14.3mm/hr、層厚200mmの場合は、9.0~11.7mm/hr、層厚600mmの場合は、9.0mm/hr以上、層厚1000mmの場合は、9.0mm/hr以上であった。

排水層厚 L_1 と植栽層厚 L_2 の比と湛水生成限界雨量強度の関係を示すと、Fig.9 のようになる。初め比率が0すなわち排水層なしの場合から、比率増加にともない限界強度は増加してゆく。この関係は層厚に依らない直線の変化である。しかし、やがて、これらは植栽層厚に依存する様式で大きさを変えながら頭打ちとなってゆく。この結果、

Fig.5 Relation between rainfall intensity and ponding depth for 200mm planting depth. Subscripts of y indicate draining layer thicknesses

Fig.6 Relation between rainfall intensity and ponding depth for 600mm planting depth. Subscripts of y indicate draining layer thicknesses

Fig.7 Relation between rainfall intensity and ponding depth for 1000mm planting depth. Subscripts of y indicate draining layer thicknesses

植栽層単独のものに比べ、なんらかの層厚の排水層を敷設することは、湛水生成強度を大きくする、すなわち、湛水を生成しにくくさせる効果があると言える。グラフから、どの植栽層厚に対しても、およそ60mmの排水層厚で頭打ちとなっていることがわかる。これは、湛水抑制のための排水層厚増加の限界が60mm程度であることを意味している。しかし、この効果も植栽層厚が増加すると効果が認められなくなる。植栽層厚が大きくなれば、ほぼ一定の特定の値を示すものと思われる。すなわち、土壌内部の水分が飽和状態となり、完全に重力のみによって流れると想定した場合、水分フラックスは、 $-k_g$ で示される。植栽層に用いた材料の特性から、これに対応する雨量強度を求めてみると、9.07mm/hrとなり、Fig.9の最小値と一致する。したがって、湛水生成限界雨量強度の下限は、植栽層の飽和透水係数によって定まっていることが分かる。限界強度が大きいくほど現実には具合が良いのだが、この値を増加させる効果は植栽層の薄いときだけに限られるといえる。

4. 結論

連続降雨の結果生じる湛水深は、層構造排水能力の指標となりうる。その上で、数値解析の結果から以下のような結論を導くことができる。

- 1) 湛水深の増加は、排水層厚よりも、植栽層厚に大きく依存する。
用いた試料の場合、植栽層厚1mmの変化に対して0.11 mm/(mm/hr)の湛水増加強度変化を与える。この値の物理的内容は近似的に $\rho_L/(k_g)$ といえ、飽和透水係数に反比例する。また、この値に植栽層厚 L_2 を掛けた量が降雨強度による生成湛水深の増加割合となる。植栽層厚の増加が急激な湛水増加を与える原因である。
- 2) 排水層厚を増大させても湛水を減じる効果は少ない。
- 3) 排水層の敷設は湛水を生成しにくくさせる効果（湛水抑制効果）があると言えるが、この効果は植栽層厚が薄い領域に限られる。
排水層材料にアカダマ土を使用した場合では、植栽層厚に関わらず、この効果が得られる最適排水層厚はおおよそ60mmである。

したがって、排水層は敷設した方が望ましいが、大きな層厚にする必要はなく、また、可能な限り植栽層厚を薄く設計した方が排水という面からは有利といえる。

粗粒質排水層は、その透水特性上飽和しないしその近傍では極度に大きな透水性を有するので、植栽層からの水分排除に有利というよりは、むしろ、排除水分を速やかに収容構造外に排出するのに有用であると推定できる。

引用文献

- 1) 東京都下水道局、下水道局行政評価（平成14年度版）、http://www.gesui.metro.tokyo.jp/oshi/inf0150/kubu_section1.pdf.
- 2) 財団法人都市緑化技術開発機構編（1999）：環境共生時代の都市緑化技術 屋上・壁面緑化技術のてびき：大蔵省印刷局
- 3) 興水 肇（1979）：人工地盤における緑地植物の植栽に関する研究について：造園雑誌 42(5), 22-25
- 4) 高 錫九（1994）：団粒性用土「赤玉」の水分保持並びに蒸発に伴う水分移動機構に関する研究：千葉大学博士論文

Abstract : Even if it is a common sense to install some coarse materials as the draining layer underlying the planting layer, we have a little of information on the role of the coarse materials in drainage process. This study evaluated it numerically by using the unsaturated Darcian soil water simulator with alternating two kinds of boundary conditions. The physical properties of the volcanic ash soil and the 5-10 mm crushed crumbs were applied to calculation. At steady state, the thickness of the upper layer, planting layer, has a large effect on the ponding depth of soil surface, but that of the lower layer, coarse materials, has a little of effect on it. Under the rainfall intensity 50 mm/hr, the ponding depths for the upper layers of 100 and 200 mm result in 396-453 mm and 851-905 mm, respectively. At 100 mm planting layer, the critical rainfall intensities for ponding occurrence have the values between 9.0 and 14.3 mm/hr, and they were increased with the thickness of the lower draining layer.

Keywords: *planting layer, drainage, Darcy's law, numerical analysis, hydraulic conductivity*

Fig.8 Relation between ponding depth and draining layer thickness in the case of $L_2=100$ mm

Fig.9 Dependence of ratio L_1/L_2 on the critical rainfall intensity at ponding occurrence

- 5) Liu, J., Choi, H., Dai, W., Bajracharya, U., Amemiya, Y. (1998): Numerical evaluation of planting depth of the aggregate mixed and non-mixed layer for landscape planting., Proc. 35th World Congress of Int. Fed. Landscape Architecture, Bali.
- 6) Liu, J. (1998): Studies on the behavior of soil water in the sand-Akadama and Kuroboku-Akadama soil mixtures, Doctorate thesis of Chiba University
- 7) Campbell, G.S. (1985): Soil physics with BASIC, Elsevier, Amsterdam
- 8) 崔 炯碩・雨宮 悠（1998）：水分消費からみた有底植栽土層の層厚決定に関する数値的評価：ランドスケープ研究 62(5), 499-502

（2004.3.27 受付, 2004.9.4 受理）