

# 复杂型生物滞留设施的渗透性能试验研究

潘仪凯, 张海江, 张旭伟, 周绪旭  
(镇江市建设工程质量监督站, 江苏 镇江 212000)

**摘要:** 为研究复杂型生物滞留设施的渗透性能,采用常水头和降水头渗透试验测定碎石排水层和种植介质层的理论渗透系数,采用入渗试验得到种植介质层的入渗率,根据入渗率与水力坡降关系计算渗透系数。结果表明:碎石排水层的理论渗透系数远大于种植介质层的,碎石排水层的空隙不会被水充满,种植介质是复杂型生物滞留设施的有效土柱;入渗率整体上随时间先减小后增大,减小部分符合入渗能力三阶段理论,增大部分主要是因为蓄水层积水升高且种植介质厚度有限,符合 Green-Ampt 模型;种植介质的渗透系数可视为定值,但非固定不变的定值,约为理论渗透系数的 80%~115%,且存在随时间递减的趋势以及与水力负荷成正比的可能性。复杂型生物滞留设施的渗透性能由种植介质层决定,渗透量可以采用种植介质的理论渗透系数进行计算,但理论渗透系数的确定和选取应慎重。

**关键词:** 复杂型生物滞留设施; 入渗率; 渗透系数; 种植介质层; 碎石排水层; 积水  
**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)23-0134-05

## Permeability of Complex Bioretention System

PAN Yi-kai, ZHANG Hai-jiang, ZHANG Xu-wei, ZHOU Xu-xu

(Construction Project Quality Supervision Institutions of Zhenjiang City, Zhenjiang 212000, China)

**Abstract:** In order to study the permeability of complex bioretention system, the constant-head test and falling-head test were used to obtain the theoretical permeability coefficient of gravel drainage layer and planting medium layer. The infiltration rate through planting medium was measured by the infiltration test, and the permeability coefficient was calculated by the infiltration rate and hydraulic gradient. The results showed that the permeability coefficient of the gravel drainage layer was much larger than that of the planting medium layer, the space of the gravel drainage layer was not fully filled with water, and the planting medium was the effective column of the complex bioretention system. Overall profile of the infiltration rate firstly decreased and then increased with time. The decreased part met the theory of three-stage infiltration capacity, and the increased part was mainly due to the rise of water in the aquifer and the limited thickness of planting medium, which was in line with the Green-Ampt model. The permeability coefficient of the planting medium could be regarded as a constant value, but it was not a fixed value, which was approximately 80% to 115% of theoretical permeability coefficient, and it tended to decrease with time and probably proportional to the hydraulic load. Permeability of a complex bioretention system was determined by the planting medium layer. The infiltration capacity could be calculated by using the theoretical permeability coefficient of planting medium, but the theoretical permeability coefficient must be carefully determined and selected.

**Key words:** complex bioretention system; infiltration rate; permeability coefficient; planting medium layer; gravel drainage layer; ponding

生物滞留设施是指在地势较低的区域,通过植物、土壤和微生物系统蓄渗、净化径流雨水的设施,汇集降雨产生的地表径流,通过入渗方式实现控制径流污染、削减径流总量和径流峰值的功能,被广泛应用于我国海绵城市建设中。生物滞留设施的土壤渗透能力是入渗过程的重要参数。理解和掌握生物滞留设施的渗透过程对我国海绵城市建设的理论基础和工程实践具有一定意义。

目前,国内外学者针对生物滞留设施的渗透性能已经进行了一些研究,例如,Olszewski等测定了生物滞留设施种植介质的入渗率和渗出速率<sup>[1]</sup>;唐双成等通过对西安市某高校简单型雨水花园的实地监测,表明土壤入渗率在4年内比较稳定<sup>[2]</sup>;王亚军等研究了储水式生物滞留设施的渗透性能,表明渗透系数与水力负荷之间呈非线性关系<sup>[3]</sup>。但生物滞留设施的试验研究和工程实践往往只重视种植介质层的渗透性能,未说明碎石排水层对复杂型生物滞留设施的整体渗透性能是否存在影响;入渗试验基本为恒定常水头试验,与蓄水层积水升高类似的变水头的入渗试验较少。鉴于此,笔者以复杂型生物滞留设施(简称“设施”)为研究对象,利用TST-70型渗透仪和室外未种植植物的设施中试装置进行渗透试验和入渗试验,测定理论渗透系数、入渗率(渗出速率)及入渗过程中的实际渗透系数,以期为海绵城市建设的工程实践提供理论参考。

## 1 试验装置和方法

### 1.1 中试装置

复杂型生物滞留设施的中试装置如图1所示。

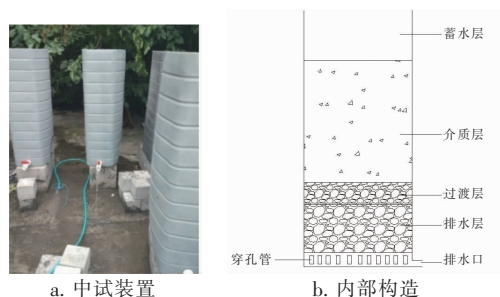


图1 复杂型生物滞留设施的中试装置

Fig.1 Schematics of complex bioretention system

中试装置由200 L的储水罐改装而成,长、宽、高分别约为45、45、120 cm,实测横截面积为0.176 m<sup>2</sup>。内部由上向下依次为200 mm蓄水层、600 mm种植介质层、100 mm过渡层、300 mm碎石层(底部

设置直径为100 mm的穿孔HDPE排水管)。种植介质属于砂壤土,由椰糠、表土、中粗砂按照2:2:6(质量比)制成;过渡层由50 mm的米子和50 mm的瓜子片混合、充分搅拌制成;碎石层的碎石粒径为30~50 mm。测定渗透系数时,在中试装置的底部出水口处增加软管。

### 1.2 试验方法

本试验包括渗透试验和入渗试验。渗透试验是在饱和条件下测定渗透系数,包括实验室常水头试验测定种植介质的渗透系数和室外降水头试验测定中试和碎石排水层(含过渡层和穿孔盲管)的等效渗透系数。常水头试验按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中的方法进行;降水头试验按照文献[4]中的方法进行,采用积水入渗方式饱和<sup>[5]</sup>,使用手机视频记录积水高度和时间。

入渗试验是在恒定进水速率条件下,测定入渗率和渗出速率。采用市政自来水作为进水,进水速率根据镇江市短时强降雨特征设定:在汇流面积为4 m<sup>2</sup>的条件下,针对2 h降雨量为48.9 mm的2年一遇降雨,总进水量设置为195.6 L,进水速率设为0.027 L/s;针对2 h降雨量为64.0 mm的5年一遇降雨,总进水量设为256 L,进水速率设为0.034 L/s。当积水高度达到200 mm时,终止进水。积水高度使用钢尺测量。累计出水量通过累加单次水盆瞬时盛水量获得,后者通过天平称重得到;采用手机视频记录瞬时出水量和同步时间。

### 1.3 计算方法

常水头试验的渗透系数计算见式(1),降水头试验的渗透系数计算见式(2),等效渗透系数的计算见式(3),入渗率计算见式(4),渗出速率计算见式(5)。

$$K = \frac{V_o L}{A H t_{ij}} \quad (1)$$

$$K = 2.303 \frac{L}{t} \lg \frac{H_1}{H_2} \quad (2)$$

$$K_{\text{equ}} = \frac{L}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \cdots + \frac{L_n}{K_n}} \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{in}} = (V_{\text{in}} - V_{\text{p}}) / A t_{ij} \quad (4)$$

$$\lambda_o = V_o / A t_{ij} \quad (5)$$

式中: $K$ 为渗透系数,mm/h; $L$ 为土样厚(长)度,mm; $A$ 为土样横截面积,mm<sup>2</sup>; $H$ 为水头高度,

mm;  $t_{ij}$  为时间  $t_j$  与时间  $t_i$  的差值, h;  $V_o$  为  $t_{ij}$  内的出水量, L;  $H_1$  为初始水头, mm;  $H_2$  为初始水头下降后的水头, mm;  $t$  为水头从  $H_1$  降落到  $H_2$  的时间, h;  $K_{\text{equ}}$  为等效渗透系数, mm/h;  $K_n$  为每层土的渗透系数, mm/h;  $L_n$  为每层土的厚(长)度, mm;  $\lambda_{\text{in}}$  为  $t_{ij}$  内的平均入渗率, mm/h;  $V_{\text{in}}$  为  $t_{ij}$  内的进水量(L), 计算方法见式(6);  $V_p$  为  $t_{ij}$  内的积水量(L), 计算方法见式(7);  $\lambda_o$  为  $t_{ij}$  内的平均渗出速率, mm/h。

$$V_{\text{in}} = \sum_{n=0}^j v_1 t_n - \sum_{n=0}^i v_1 t_n \quad (6)$$

$$V_p = Ah_{t_{ij}} \quad (7)$$

式中:  $v_1$  为恒定进水速率, L/h;  $h_{t_{ij}}$  为  $t_{ij}$  内的积水高度, mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 理论渗透系数

种植介质的渗透系数与孔隙比的对应关系如图2所示。

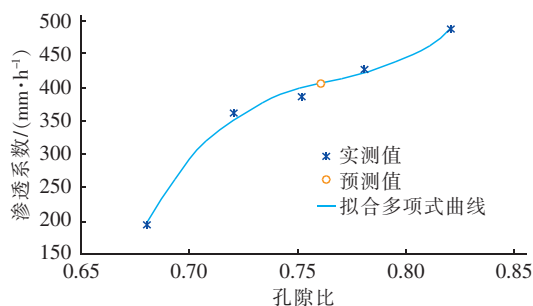


图2 种植介质的渗透系数与孔隙比的关系

Fig. 2 Relationship between permeability coefficient and void ratio of planting medium

试验之初,按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中的方法测定种植介质的渗透系数为197 mm/h,对应的孔隙比为0.68;降水头试验测定中试装置的等效渗透系数为650 mm/h,孔隙比未知。通过等效渗透系数公式计算发现,种植介质和中试装置的渗透系数的预测值与实测值偏差较大。渗透试验结束后,使用环刀在中试装置的种植介质表面下约100 mm处取样测定种植介质的孔隙比为0.76。试图直接测定孔隙比为0.76时的种植介质的渗透系数,改变击实的分层厚度,多次进行常水头渗透试验,但未能直接测定。于是,在实测值的基础上运用最小二乘法进行多项式拟合,由此预测种植介质的渗透系数。孔隙比为0.76时,种植介质的渗透系数预测值为406 mm/h,则中试装置的等效渗透系数预测值为666 mm/h,约为实测值(650 mm/h)的102%,实测值与预测值基本一致,表明种植介质的渗透系数预测值406 mm/h是可信赖的。

的102%,实测值与预测值基本一致,表明种植介质的渗透系数预测值406 mm/h是可信赖的。

试验测得碎石排水层和中试装置的渗透系数分别为19 129、650 mm/h。可知,碎石排水层的渗透系数远远大于种植介质的。渗透系数表示水在土壤中的流畅程度,其值越大则水在土壤中的移动速度就越快,反之则越慢。在底部阀门关闭和假设水在种植介质中的渗出速率为500 mm/h(详见下文)的条件下,碎石排水层空隙被水充满大约需要17 min,基本排空用时1.5 min。如果将碎石排水层看成一个储水容器,那么它的进水速率远小于出水速率,储水空间不会被水充满。在水流渗出种植介质前,碎石排水层与大气相连通;当水流渗出种植介质后,水流为自然流淌。由于出水速率远大于进水速率,碎石排水层空隙不会被水充满,种植介质和碎石排水层不满足多层状土渗透状态,不满足等效渗透系数的使用条件。在入渗过程中,种植介质是入渗过程的有效土柱,碎石排水层起排水作用。

### 2.2 入渗率随时间的变化

2年一遇和5年一遇进水速率条件下的入渗率、渗出速率和积水高度随时间的变化见图3。

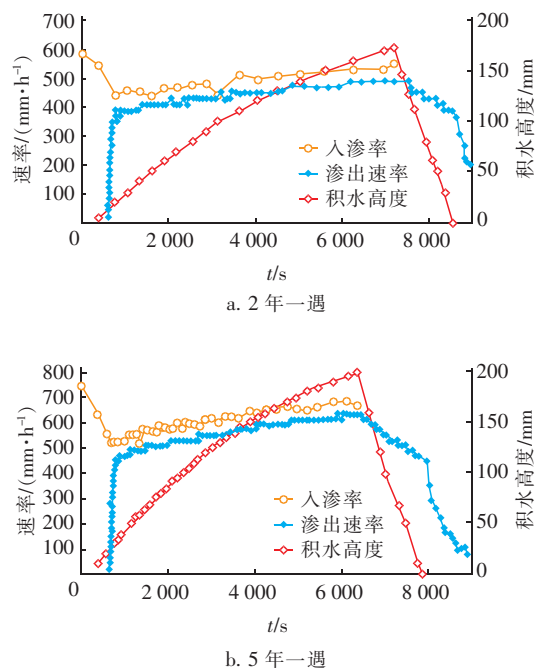


图3 不同进水速率条件下的入渗试验结果

Fig. 3 Results of infiltration test under different inflow rates

由图3可以看出,入渗率随时间的延长先减小后增大,渗出速率和积水高度则先增大后减小。在



停止进水时,入渗率、渗出速率和积水高度都达到了(相对)最大值。入渗率减小到最小值时,渗出速率进入稳定阶段,随后两者递增。停止进水后的入渗率曲线未绘出,主要原因是非研究内容,而且局部突变严重,如果绘出会影响观图效果。起始点的入渗率被设定为进水速率(事实上应为无穷大),第2个点是从小水开始到积水高度第1次测量时段内的平均值,第3个点以后是两次积水高度测量时段之间的平均值。

入渗率的减小是由于随着土样含水量不断增大,入渗能力递减所致,符合入渗能力三阶段理论;入渗率增大的主要原因是种植介质层为有限深土柱,且蓄水层积水不断升高。从图3可知,入渗率减小到最小值时,渗出速率进入稳定阶段,表明入渗已经进入渗透阶段,种植介质层的含水量已经达到田间持水量。根据 Green - Ampt 机理性模型,其基本假设<sup>[6]</sup>:①湿润锋面几乎是水平锋面;②湿润锋的吸力水头值为固定值;③湿润锋上部的土壤含水率保持不变。基于上述假设,达西定律可表示为:

$$\lambda_{in} = -K \frac{H_p + S_m + z}{z} \quad (8)$$

式中: $H_p$  为地面以上的积水高度; $S_m$  为湿润锋处的吸力水头; $z$  为湿润锋的推进距离;负号表示下渗速度的方向总是指向总势减小的方向。

因为种植介质层是设施的有效渗透土柱,所以入渗的下渗锋面在种植介质层与过渡层交界面相当于停止下移(不考虑交界面的影响),即湿润锋的推进距离  $z = 600 \text{ mm}$ ;但下渗锋面下的过渡层不会保持初始含水量,而是在水流持续渗出种植介质的条件下基本达到田间持水量,对下渗锋面上的种植介质的水分的分子力和毛管力的合力甚小, $S_m$  可以忽略。当积水高度为  $0 < H_p \leq 200 \text{ mm}$  时:

$$1 < \frac{H_p + z}{z} \leq 1.333 \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可知,当假设渗透系数为定值时,渗透阶段的入渗率随蓄水层积水高度的增加而增大,而积水高度与时间呈正相关,所以入渗率随着时间的延长而增大。

### 2.3 实际渗透系数的变化

图4为入渗过程中渗透系数随时间的变化情况,图5为渗透系数的盒形图,其中2017年8月11日、9月1日和9月30日为5年一遇条件下的入渗

试验。除9月30日外,在每次试验中渗透系数整体递增或递减的趋势均不明显,四分位极差很小,数据相对集中。虽然9月30日试验的数据波动较大,但四分位极差不大,且与异常值截断点的差值不大,整体相对较稳定。当入渗进入渗透阶段后,渗透系数可视为定值。但在图5的7次试验中渗透系数的中位数分别是理论渗透系数(406 mm/h)的115.92%、109.74%、103.99%、84.88%、88.20%、78.27%和98.96%,表明渗透系数是非固定不变的定值,理论渗透系数代表实际渗透系数的代表性较强。

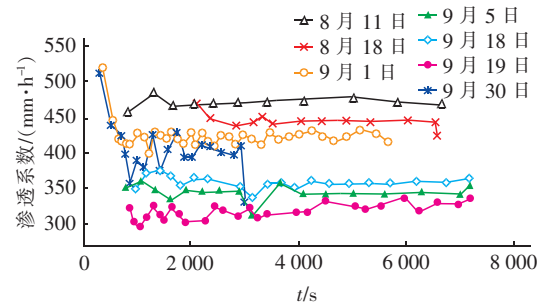


图4 渗透系数随时间的变化

Fig. 4 Variation of permeability coefficient with time

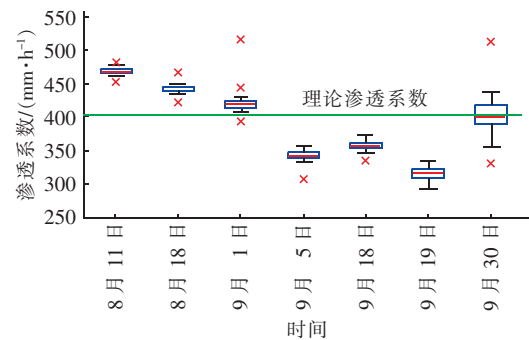


图5 渗透系数的盒形图

Fig. 5 Plot box of permeability coefficient

由图4和图5可知,渗透系数的初期值大于后期值,5年一遇进水速率条件下的渗透系数大于2年一遇的可能性存在。由于未进行分层击实,种植介质层初期的密实度小,孔隙比大,渗透系数大;在自然沉积和间歇水力作用下,种植介质逐渐密实,孔隙率不断变小,致使渗透系数减小,所以初期值大于后期值。渗透系数是渗流速度与水头梯度的比值。渗流速度受入渗率的影响,水头梯度受供水强度、土壤质地和土壤含水量的影响<sup>[7]</sup>,所以供水强度可能对渗透系数有影响。在水力负荷作用下,不仅仅是液相和气相改变,固相颗粒群间的构造也发生变化,颗粒间的空隙与塌陷区域会改变。受到加压膨胀特

性的影响,颗粒间空隙变大的区域多于塌陷区域<sup>[3]</sup>,可能是5年一遇进水速率条件下的渗透系数大于2年一遇的原因。

### 3 结论

① 复杂型生物滞留设施的碎石排水层的等效渗透系数远大于种植介质层的。在入渗过程中,碎石排水层空隙不会被水充满;种植介质层不会与碎石排水层形成多层状土渗透状态,是入渗过程的有效土柱。

② 复杂型生物滞留设施的入渗率随时间的延长先减小后增大。减小部分是由于随着土样含水量不断增大,入渗能力递减所致,符合入渗能力三阶段理论;增大部分主要是因为种植介质层为有限厚度,且积水不断增高,致使水力坡降增大,符合 Green - Ampt 机理性模型。

③ 复杂型生物滞留设施的种植介质的渗透系数可视为定值,其中位数约为理论渗透系数的80%~115%,未与理论渗透系数保持一致,表明渗透系数非固定不变的定值,但理论渗透系数代表实际渗透系数的代表性较强。

④ 复杂型生物滞留设施的种植介质的渗透系数随时间的延长呈递减趋势,且随水力负荷的增大而变大的可能性存在。

### 参考文献:

- [1] Olszewski J M. The Hydrologic and Water Quality Performance of the Sligo-Dennis Bioretention Cell[D]. College Park; University of Maryland, 2010.
- [2] 唐双成,罗纨,贾忠华,等. 雨水花园对暴雨径流的消减效果[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 787 - 794.  
Tang Shuangcheng, Luo Wan, Jia Zhonghua, et al. Effect of rain gardens on storm runoff reduction[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 787 - 794 (in Chinese).
- [3] 王亚军,张弘,韦昆. 雨水花园过滤系统的渗透性能试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(6): 1308 - 1312.  
Wang Yajun, Zhang Hong, Wei Kun. Experimental study of permeability in rainwater garden filtration system[J].

Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(6): 1308 - 1312 (in Chinese).

- [4] 布雷杰 M 达斯, 哈立德·索班. 土力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.  
Das Braja M, Sobhan Khaled. Soil Mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 2016 (in Chinese).
- [5] 张华, 吴争光. 封闭气泡对一维积水入渗影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊2): 132 - 137, 148.  
Zhang Hua, Wu Zhengguang. Experimental research on the effect of entrapped air on one-dimensional ponded water infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 132 - 137, 148 (in Chinese).
- [6] 杨德军, 张土乔, 张科锋. 土壤水动力学模型及在 SPAC 系统建模中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2011.  
Yang Dejun, Zhang Tuqiao, Zhang Kefeng. Soil Water Dynamic Model and Its Application in SPAC System Modeling[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2011 (in Chinese).
- [7] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.  
Rui Xiaofang. Principle of Hydrology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013 (in Chinese).



作者简介: 潘仪凯(1976 - ), 男, 江苏镇江人, 本科, 高级工程师, 主要从事房屋建筑和市政工程技术理论与应用研究。

E-mail: 1075810753@qq.com

收稿日期: 2018 - 07 - 26