

储水式复杂型生物滞留设施的渗透系数试验研究

张海江¹, 周绪旭¹, 周大强², 潘仪凯¹, 张旭伟¹

(1. 镇江市建设工程质量监督站, 江苏 镇江 212000; 2. 镇江市建科工程质量检测中心有限公司, 江苏 镇江 212000)

摘要: 采用常水头和降水头渗透试验测定储水式复杂型生物滞留设施的种植介质层、碎石排水层(含过渡层和穿孔管)和中试装置(未种植植物)的渗透系数。结果表明,采用常水头渗透试验测得种植介质的渗透系数为 197 mm/h、孔隙比为 0.68,中试装置中种植介质的孔隙比为 0.76、渗透系数预测值为 406 mm/h;采用降水头渗透试验测得中试装置的等效渗透系数为 650 mm/h,碎石排水层的渗透系数为 19 129 mm/h。储水式复杂型生物滞留设施的等效渗透系数由种植介质的渗透系数主导控制,受碎石排水层的渗透系数影响甚小,但受碎石排水层的厚度影响较大。

关键词: 储水式复杂型生物滞留设施; 渗透系数; 种植介质; 碎石排水层

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)07-0135-04

Permeability Coefficient Test of Complex Bioretention System with Internal Water Storage

ZHANG Hai-jiang¹, ZHOU Xu-xu¹, ZHOU Da-qiang², PAN Yi-kai¹,
ZHANG Xu-wei¹

(1. Construction Project Quality Supervision Institution of Zhenjiang City, Zhenjiang 212000, China;
2. Zhenjiang Jianke Engineering Quality Testing Center Co. Ltd., Zhenjiang 212000, China)

Abstract: The permeability coefficients of the planting media layer, the gravel drainage layer (including transition layer and perforated pipe) and the pilot bioretention system (no plant) with internal water storage were determined by the constant-head test and falling-head test. The results showed that the permeability coefficient of the planting media and the void ratio were 197 mm/h and 0.68 by the constant-head permeability test, and the void ratio and predicted permeability coefficient of the planting media in the pilot bioretention system were 0.76 and 406 mm/h. The measured equivalent permeability coefficient of the pilot bioretention system was 650 mm/h by the falling-head test, and the permeability coefficient of gravel drainage layer was 19 129 mm/h. The equivalent permeability coefficient of the complex bioretention system with internal water storage was dominated by the permeability coefficient of the planting media. It was rarely affected by the permeability coefficient of the gravel drainage layer, however, it was greatly affected by the thickness.

Key words: complex bioretention system with internal water storage; permeability coefficient; planting media; gravel drainage layer

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,

具有源头分散控制径流污染、削减径流总量和径流峰值的功能,被广泛用于我国海绵城市建设中。在

《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》中,生物滞留设施分为简单型和复杂型,前者包括植物、蓄水层、覆盖层、原土和溢流井,后者则更换原土为种植介质,增加配套的透水土工布或100 mm砂层的过渡层,底部铺设包含穿孔管的砾石层,视实际情况可配置防渗膜。为了更好地实现反硝化作用和削减径流总量,将穿孔管增加向上弯头后接入溢流井,称为内部储水式^[1-2],本研究定义为储水式复杂型生物滞留设施。目前,对生物滞留设施的研究往往只重视种植介质层的渗透性能^[1],假定碎石排水层较薄。但在工程实践中,碎石排水层较厚^[3],能否用种植介质层的渗透系数代表生物滞留设施整体的渗透性能,值得思考和研究。笔者利用渗透仪和未种植植物的储水式复杂型生物滞留设施中试装置,采用常水头和降水头渗透试验测定种植介质、碎石排水层(含过渡层和穿孔管)的渗透系数以及中试装置的等效渗透系数,并分析三者之间的联系,以期工程实践提供参考。

1 试验装置和方法

1.1 中试装置

镇江市海绵城市建设中采用的储水式复杂型生物滞留设施的结构如图1(a)所示,其中试装置由200 L储水罐改装而成,长、宽、高分别约为45、45、120 cm,容积为0.2 m³,内部结构如图1(b)所示。

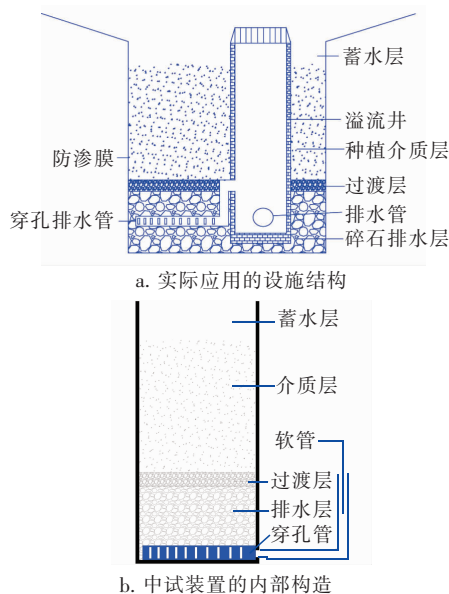


图1 储水式复杂型生物滞留设施及其中试装置

Fig. 1 Complex bioretention system with internal water storage and its pilot-scale setup

中试装置内部由上到下分别为200 mm蓄水层、600 mm种植介质层、100 mm过渡层和300 mm碎石排水层(底部设置直径为100 mm的HDPE穿孔管,孔口位于管壁的环肋中部)。种植介质属于砂壤土,由椰糠、表土、中粗砂按照2:2:6的质量比混合而成;过渡层由50 mm的米子和50 mm的瓜子片混合而成;排水层的碎石粒径为30~50 mm。共构建6个中试装置,其中4个为生物滞留设施,2个仅由过渡层和碎石排水层构成。

1.2 试验方法

实验室常水头渗透试验采用《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中的方法进行,用于测定种植介质的渗透系数。

室外降水头渗透试验测定碎石排水层和中试装置的等效渗透系数,采用积水入渗方式进行饱和^[4],使用手机视频记录积水高度和时间。标准降水头试验是以横截面积为 a 的细立管在时间 t 内的水位降落来计算渗流量,如图2(a)所示。

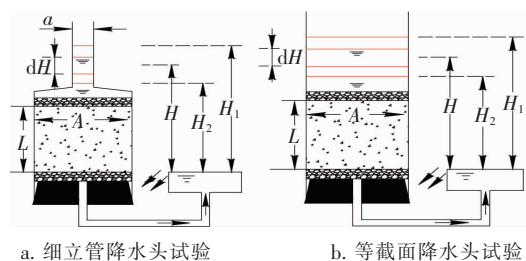


图2 降水头试验

Fig. 2 Falling-head test

根据流动连续性可得:

$$AK \frac{H}{L} = -a \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

整理得:

$$dt = \frac{aL}{AK} \left(-\frac{dH}{H} \right) \quad (2)$$

分离变量积分得:

$$t = \frac{aL}{AK} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (3)$$

或:

$$K = 2.303 \frac{aL}{At} \lg \frac{H_1}{H_2} \quad (4)$$

式中: H_1 为初始水头,mm; H_2 为下降后的水头,mm; t 为水头从 H_1 降到 H_2 的时间,h; K 为渗透系数,mm/h。

如果 $a = A$, 如图 2(b) 所示, 细立管渗透试验变成等截面渗透试验, 流动连续性和式(1)~(4)同样成立^[5], 式(4)简化成:

$$K = 2.303 \frac{L}{t} \lg \frac{H_1}{H_2} \quad (5)$$

中试装置符合等截面降水头试验的工作原理, 可以进行降水头试验, 采用式(5)计算渗透系数。但中试装置属于多层状土, 其等效渗透系数如下:

$$K_{\text{equ}} = \frac{L}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \cdots + \frac{L_n}{K_n}} \quad (6)$$

式中: K_{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 为每层土的厚度, mm。

2 结果与讨论

2.1 实测值与预测值的验证

试验之初, 按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 中的方法测得种植介质的渗透系数为 197 mm/h, 对应的孔隙比为 0.68; 降水头试验测得中试装置的等效渗透系数为 650 mm/h、孔隙比未知, 碎石排水层的渗透系数为 19 129 mm/h。通过等效渗透系数公式计算得到, 种植介质和中试装置的渗透系数预测值分别为 396、323 mm/h, 与实测值偏差较大。在实测值和等效渗透系数公式都正确的条件下, 实测值和预测值的差值不应如此之大。为了保证所有试验土样的一致性, 至渗透试验结束, 使用环刀在种植介质表面下约 100 mm 处取样测定其孔隙比, 为 0.76。笔者试图直接测定孔隙比为 0.76 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, 但均未能直接测得。于是, 在实测值的基础上运用最小二乘法进行多项式拟合, 通过拟合预测种植介质的渗透系数, 如图 3 所示。在孔隙比为 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, 表明中试装置的等效渗透系数实测值是正确的, 种植介质的渗透系数预测值是可信的。

常水头渗透试验的土样分层和夯实标准存在结果不确定因素, 但通过测定孔隙比的方式可消除这些人因因素的影响。在工程实践中, 海绵城市建设文件仅要求种植介质的渗透系数, 未指出渗透系数对应的孔隙比。在工程检验时, 种植介质的渗透系

数是可变值, 或者说可以人为控制。从工程管理角度出发, 海绵城市建设文件应明确种植介质的渗透系数对应的孔隙比, 为种植介质的生产、施工回填成型和检验提供切实可操作的控制标准。

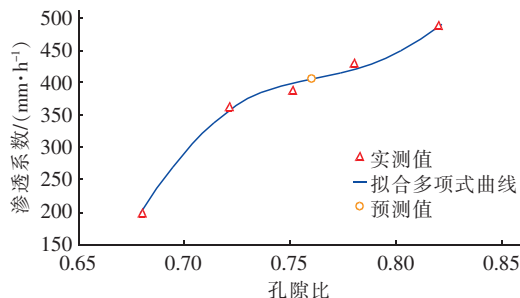


图3 种植介质的渗透系数与孔隙比的关系

Fig. 3 Relationship between permeability coefficient and void ratio of planting media

2.2 碎石排水层对装置等效渗透系数的影响

由 2.1 节可知, 种植介质的渗透系数与中试装置的等效渗透系数处于同一数量级, 远小于碎石排水层的渗透系数, 表明种植介质的渗透系数在设施渗透过程中处于主导控制地位, 碎石排水层的渗透系数影响甚小, 这与曹瑞雪等的结论一致: 无论细质土垫底还是粗质土垫底, 细质土控制入渗过程^[6]。种植介质的渗透系数约为中试装置等效渗透系数的 62%, 虽然处于主导地位, 但表明存在其他因素构成等效渗透系数。

由式(6)可知, 层状土壤等效渗透系数是每层土壤渗透系数和厚度的函数。对于两层结构的层状土壤, 假设下层土壤的渗透系数趋于无限大且厚度不可忽略时, 该层水头损失几乎为零, 即式(6)中的 L_2/K_2 约为零, 则有:

$$K_{\text{equ}} = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2}} \approx \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{K_1}} = K_1 + \frac{L_2}{L_1} K_1 = (1 + \frac{L_2}{L_1}) K_1 \quad (7)$$

由式(7)可知, 中试装置的等效渗透系数由上层土壤的渗透系数主导, 下层厚度 L_2 越大、上层厚度 L_1 越小则等效渗透系数就越大, 表明每层土壤的厚度对等效渗透系数有影响。

碎石排水层的渗透系数远大于种植介质的渗透系数, 相对种植介质是无穷大值。碎石排水层的厚度 L_2 取值为 350 mm, 种植介质层的实测厚度 L_1 为

550 mm,由式(7)可知,中试装置的等效渗透系数约为种植介质渗透系数的1.64倍,相当于碎石排水层的厚度将种植介质的渗透系数放大1.64倍,表明碎石排水层的厚度对中试装置的等效渗透系数有显著影响。

目前,储水式复杂型生物滞留设施未被列入《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》以及《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》(GB 50400—2016)和《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017),但却被应用在我国海绵城市建设实践中。在使用该设施时,不仅要考虑种植介质渗透系数的主导控制地位,还应考虑碎石排水层的厚度影响,否则不仅不符合多层含水层渗透理论,还有可能低估了该设施的整体渗透性能,造成有效渗透面积计算偏大。

3 结论

① 针对储水式复杂型生物滞留设施,采用实验室常水头渗透试验测得种植介质的渗透系数为197 m/h,孔隙比为0.68;而采用室外降水头渗透试验测得中试装置中种植介质的孔隙比为0.76,渗透系数预测值为406 m/h。在海绵城市建设工程实践中,在应用渗透系数时应明确其对应的孔隙比,否则易引起误导或误判;同时应制定种植介质回填成型控制标准,完善或改进试验室测定渗透系数的土样成型方式或标准,实现理论与实践一致。

② 储水式复杂型生物滞留设施中试装置的等效渗透系数为650 m/h,种植介质的渗透系数为406 mm/h,碎石排水层(含过渡层和穿孔管)的渗透系数为19 129 mm/h。设施的等效渗透系数大于种植介质的渗透系数,主要是因为碎石排水层厚度对等效渗透系数的影响不可忽略。在采用渗透系数进行设施规模计算时,储水式复杂型生物滞留设施不仅要确保种植介质渗透系数的主导控制地位,而且还应考虑碎石排水层厚度的影响。

参考文献:

- [1] Hunt III W F. Pollutant Removal Evaluation and Hydraulic Characterization for Bioretention Stormwater Treatment Devices [D]. Commonwealth of Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2003.
- [2] Liu J, Sample D J, Bell C, et al. Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater [J]. Water, 2014, 6(4): 1069–1099.
- [3] Olszewski J M. The Hydrologic and Water Quality Performance of the Sligo-dennis Bioretention Cell [D]. Maryland: University of Maryland, College Park, 2010.
- [4] 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).
- [5] 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.
Braja M D, Khaled S. Soil Mechanics [M]. Beijing: China Machine Press, 2016 (in Chinese).
- [6] 曹瑞雪, 邵明安, 贾小旭. 层状土壤饱和导水率影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 18–21.
Cao Ruixue, Shao Ming'an, Jia Xiaoxu. Experimental study on effects of layered soils on saturated hydraulic conductivity [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2015, 29(3): 18–21 (in Chinese).



作者简介: 张海江(1982—), 男, 黑龙江五常人, 硕士, 工程师, 主要从事市政工程技术理论与应用研究。

E-mail: 88070389@qq.com

收稿日期: 2018-08-12