

种植土—碎石绿化带渗透性能原位测试方法

关彤军^{1,2}, 刘姣¹, 徐晓攀³, 张春会^{1,2}, 赵彦辉², 马志中²

(1. 河北科技大学 建筑工程学院, 河北 石家庄 05001; 2. 石家庄市市政设计研究院有限责任公司;

3. 奥来国信(北京)检测技术有限责任公司)

摘要:为监测海绵城市种植土—碎石绿化带结构长期渗透性能,提出了一种种植土—碎石绿化带渗透性能原位测试装置。测试装置由亚克力板试验桶、降水系统和水位监测系统组成。基于一维非饱和渗流理论,提出了测试过程中种植土饱和时间确定方法,进而形成了种植土—碎石绿化带结构渗透系数原位测试方法。依据提出的测试装置,在试验室开展了种植土—碎石绿化带结构渗透系数测试的足尺模型试验,测试试验模型中种植土的饱和时间和渗透系数,与该文理论方法计算结果对比表明:理论值与试验观测值基本一致,说明该文方法可用于种植土—碎石绿化带结构渗透性能原位测试。

关键词:种植土—碎石绿化带; 渗透系数; 测试装置; 饱和时间

1 引言

海绵城市种植土—碎石绿化带的工作原理为:机动车道或广场不透水路面的雨水顺路面横坡流入下凹种植土碎石绿化带内,通过种植土绿化带渗入地下,补给地下水。种植土碎石绿化带为双层结构,上层为60~80 cm种植土,下层为级配碎石,粒径为3~5 cm。碎石层孔隙比一般为0.4左右,孔隙空间大,能够存储来不及入渗地下的雨水。碎石层下接原位地层,雨水逐渐渗入到地层内。若原位地层渗透性差,可以设置碎石渗水井加速雨水入渗。种植土内种植草、树等植物。当收集的路面径流雨水渗透通过种植土时,种植土孔隙骨架阻截、吸附雨水内的污染物,使得入渗雨水水质得到净化。然而,种植土不停截留雨水内的悬浮物等污染物,可能堵塞土体孔隙,使得种植土渗透性能下降。因此对建成的种植土—碎石绿化带的渗透性能进行长期现场监测,是种植土—碎石绿化带结构在海绵城市建设中进一步推广应用的关键。

目前国内外对海绵城市设计理论与技术开展了很多研究。然而,目前研究主要集中于这些结构的渗水水量和水质净化性能方面,但较少关注其长期渗透性能的演化。为此,该文针对种植土—碎石绿化带海绵城市道路结构,提出一种种植土渗透性能原位测试方

法,从而为种植土—碎石绿化带海绵道路结构的长期渗透性能监测提供一种新方法。

2 测试装置

该文研制的种植土—碎石绿化带结构渗透系数原位测试试验装置如图1所示。该试验装置由上套筒、下套筒、降水系统、水位监测系统组成。上套筒和下套筒为亚克力板材质,直径80 cm。下套筒埋置于种植土内,下端与碎石层相通,上端面略低于种植土表面,桶内区域与种植土其他区域相同,也种植植物,总体上桶内区域与其他区域同环境。上套筒底端设凹槽和密封圈,与下套筒连接后,接口不漏水。上套筒顶端设降水喷头,降水喷头与水泵和水箱连接,通过流量计控制降水流量(强度)。上套筒低端设置水位计,桶外使用数据采集仪实时测量套筒内水位。

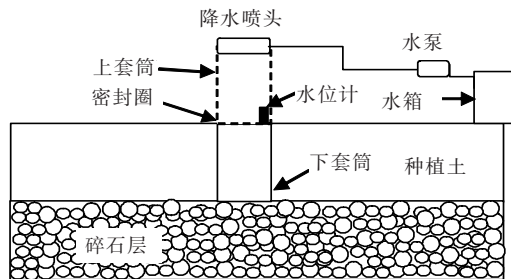


图1 种植土渗透系数原位测试装置

收稿日期:2020-03-12

基金项目:河北省重点科技研发项目(编号:18276109D)

作者简介:关彤军,男,教授级高工, E-mail: tongjun_guan@126.com

下套筒随种植土回填,埋于种植土内。测量渗透系数时,通过清理露出下套筒上端口,将上套筒与下套筒连接,水箱蓄满水,开启水泵,通过流量计控制流量,通过降水喷头降水,使得桶内种植土发生竖向渗流,当种植土饱和后,降水使得桶内水位达到一定高度,然后停止降水,通过水位计测量不同时间的桶内水位,进而计算种植土的饱和渗透系数。

3 测量原理

3.1 饱和渗透系数

种植土饱和,降水沿种植土渗流为一维饱和渗流,若初始时间 t_1 时,桶内水位处相对于排水边界处的总水头为 H_1 ,时间 t_2 时,桶内水位处相对于排水边界处的总水头为 H_2 ,其渗流示意图如图 2 所示。

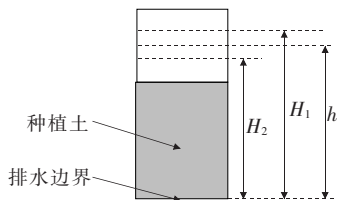


图 2 种植土饱和和渗流分析示意图

种植土上方桶内过水断面流量 q 为:

$$q = -A \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

式中: A 为桶横截面面积 (cm^2); t 为时间 (h); h 为桶内水位 (cm)。

根据达西定律,种植土内流出的流量为:

$$q = K_s \frac{h}{L} A \quad (2)$$

式中: K_s 为饱和渗透系数 (cm/h); L 为种植土厚度 (cm)。

由式(1)、(2),可得:

$$K_s dt = -\frac{L}{h} dh \quad (3)$$

对式(3)积分,可以得到:

$$K_s = \frac{L (\ln H_1 - \ln H_2)}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

式(4)即为该文测试方法渗透系数计算公式。

3.2 种植土饱和和时间

种植土初始状态为非饱和,通过降水使得套筒内种植土饱和,然后才能够利用式(4)测量饱和渗透系数。因此,恒定降水强度条件下,确定种植土饱和和时间极为重要,下面给出种植土饱和和时间确定方法。

在原位测试过程中,套筒内降水入渗可视为一维非饱和竖向入渗,种植土非饱和状态下的渗透系数 $K_T(\Psi)$ 可以写为:

$$K_T(\Psi) = K_s \exp(\alpha \psi) \quad (5)$$

式中: $K_T(\Psi)$ 为负孔压 Ψ 条件下的渗透系数 (cm/h); α 为试验常数 ($1/\text{cm}$); ψ 为压力水头 (cm)。

于是无量纲的相对渗透系数 K 为:

$$K = \frac{K_T}{K_s} = \exp(\alpha \psi) \quad (6)$$

非饱和种植土的体积含水率 θ 可以写为:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp(\alpha \psi) \quad (7)$$

式中: θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率。

如图 3 所示,种植土厚度为 L ,宽度为 b ,降水强度为 q_L ,取种植土下边界中点为坐标原点 O ,坐标 z 轴正方向向上, O 点下方为碎石层, O 位置视为排水条件,由渗流理论,降水的入渗方程为:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K_T(\Psi) \frac{\partial (\psi + z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (8)$$

式中: t 为时间; Ψ 为种植土内负孔隙水压力水头 (cm)。

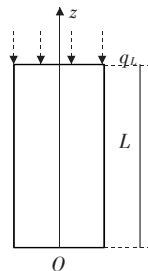


图 3 计算模型

令:

$$\left. \begin{aligned} z_R &= \alpha z \\ L_R &= \alpha L \\ K_T &= K K_s \\ q_{RL} &= q_L / K_s \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$t_R = \frac{\alpha K_s t}{\theta_s - \theta_r}$$

式中: z_R 、 L_R 、 K 、 q_{RL} 、 t_R 均为无量纲量。

将式(5)、(7)代入式(8),结合式(9),有:

$$\frac{\partial^2 K}{\partial z_R^2} + \frac{\partial K}{\partial z_R} = \frac{\partial K}{\partial t_R} \quad (10)$$

令 q_A 为种植土表面初始状态流量,该值决定了初始孔隙水压力曲线形态,由地表土含水率通过拟合确定,定义 $q_{RA} = q_A / K_s$ 。在下边界,种植土与碎石层相接,其负孔隙水压力为 ϕ_0 。于是,初始条件为:

$$K(z_R, 0) = q_{RA} - (q_{RA} - e^{\alpha \phi_0}) e^{-z_R} = K_0(z_R) \quad (11)$$

种植土下边界条件为:

$$K(0, t_R) = \exp(\alpha \psi_0) \quad (12)$$

上边界的边界条件为:

$$\left[\frac{\partial K}{\partial z_R} + K \right]_{z_R=L_R} = q_{RL} \quad (13)$$

综合式(11)~(13),由积分变换方法获得式(10)

的解为:

$$K = q_{RL} - (q_{RL} - e^{\alpha \psi_0}) e^{-z_R} - \quad (14)$$

$$4(q_{RL} - q_{RA}) e^{(L_R - z_R)^{1/2}} e^{-t_R/4} M$$

式(14)中:

$$M = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_n z_R) \sin(\lambda_n L_R) e^{-\lambda_n^2 t_R}}{1 + (L_R/2) + 2\lambda_n^2 L_R} \quad (15)$$

式(15)中 λ_n 为下方方程的正值解:

$$\tan(\lambda L_R) + 2\lambda = 0 \quad (16)$$

利用式(14)可以计算恒定降水 q_L 条件下不同降水历时种植土的相对渗透系数曲线,相应的负孔隙水压力由式(6)可按下式计算:

$$\psi = \frac{1}{\alpha} \ln K \quad (17)$$

观测不同降水历时孔压分布曲线形态,当孔压分布曲线与孔压 0 轴面积代数和为 0 时,如图 4 所示,可视为种植土恰巧饱和,相应的降水历时即为种植土饱和时间。

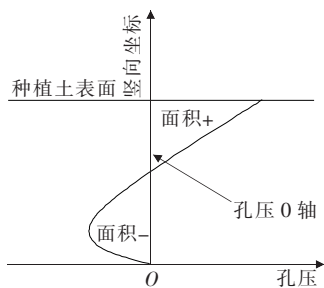


图4 种植土内饱和情况判断示意图

4 试验验证

为了验证该文方法原位测试种植土绿化带渗透性能的可行性,在室内试验室开展了试验验证。

4.1 试验装置

按照图 1 所示的种植土—碎石绿化带原位测试装置结构,在室内制作了种植土渗透系数测试足尺试验模型。

试验模型由试验桶、降水系统和量筒等水收集系统组成。试验铁桶高度为 160 cm、直径为 80 cm。降水系统主要由铁制框架、降水喷头、储水箱、潜水泵、流

量计构成,降水强度由流量计控制,降水喷头为工厂订制,能够对试验桶内种植土均匀降水。试验桶底板周围高中间低,呈漏斗形,底板中间设置出水口,水流出后使用量筒收集。在试验桶内种植土表面中心位置布置水位计,测试试验桶内水位。

4.2 试验过程及试验结果分析

参照石家庄市汇明路种植土绿化带工程,在试验中先装入 75 cm 碎石,铺设一层透水土工布,然后装入 85 cm 种植土,通过降水使得种植土完成固结,固结后种植土厚度为 60 cm。试验中种植土和碎石都取自石家庄市汇明路种植土绿化带工程现场,种植土的物理力学特性为:液限 29.8%,塑限 18.5%,塑限指数 11.3,0.5 mm 筛通过率为 97.08%,0.25 mm 筛通过率为 82.29%,0.075 mm 筛通过率为 61.04%,为低液限含砂粉土,碎石粒径 2~4 cm。种植土饱和体积含水率为 0.48,残余体积含水率为 0.23,利用吸力计测试不同体积含水率种植土的负孔隙水压力,对测试结果利用式(7)拟合, $\alpha = 0.0167/\text{cm}$ 。从试验桶内利用薄壁取土器取原状土样,抽真空制备饱水土样,利用变水头方法测试原状种植土渗透系数,种植土饱和渗透系数为 1.01 cm/h,根据种植土表层含水率,反算 $q_{RA} = 0.1$ 。

然后开展降水模型试验,开启流量泵,通过流量计控制降水量,降水速率为 2.0 cm/h。试验开始后每 5 min 计量一次收集到的降水,通过试验获得的水量与累积时间关系曲线如图 5 所示。

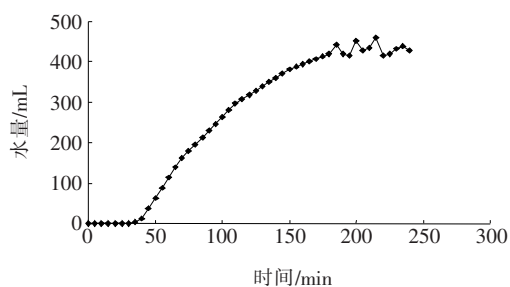


图5 收集的水量与累计时间关系

从图 5 可以看出:刚开始降水,试验桶底部无渗出水,当降水 30 min 左右,底部开始有水渗出,随着降水过程的继续,单位时间内通过种植土的水量逐渐增加,水量增加速率先较大,然后逐渐放缓,最后在 180~190 min 左右收集的水量开始基本维持在 430 mL/(5 min) 左右的恒定水平,表明这时种植土已经饱和,其渗透系数和单位时间的渗水量基本不变。

利用式(14)、(17)计算种植土内孔压演化,结果如图 6 所示。

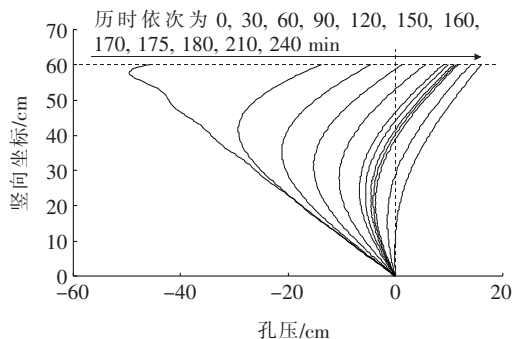


图 6 不同降水历时种植土内孔压分布

从图 6 可以看出:随着降水过程的继续,种植土内的孔隙水压力逐渐增加,当降水历时达到 175 min 时,孔压曲线与孔压 0 轴围成的面积代数和近似为 0,由此可以推断种植土饱和时间约为 175 min,这与试验观测到的 180~190 min 基本一致,表明该文方法预测试验种植土饱和时间是可行的。

降水 240 min 时,由水位计测得试验桶内水位为 18.54 cm,即 $H_1 = 78.54$ cm,中止降水,试验桶内水向下饱和和渗流,每隔 1 h 测试 1 次试验桶内水位,测试结果分别为 17.31、16.11、14.94 cm,利用式(4)计算,获得渗透系数分别为 0.95、0.94 和 0.93 cm/h,平均值为 0.94 cm/h,这与取样测试结果相比相差不大,表明该文提出的方法能够用于原位测试种植土—碎石绿化带结构的渗透系数。该文结果与取样测试结果相比略小,这可能是由于试验过程中试验桶内土体残余的压缩固结所致。

5 结语

提出了一种种植土—碎石绿化带渗透性能原位测试装置,结合渗流理论,提出了种植土—碎石绿化带结构渗透系数原位测试方法,并对原位测试方法开展了室内试验验证,结果表明该文方法获得的种植土饱和时间、渗透系数与试验观测值基本一致,该文方法可用于种植土—碎石绿化带结构渗透性能原位测试,从而为种植土—碎石绿化带海绵道路结构长期渗透性能监测提供了一种技术方法。

参考文献:

- [1] 程树斌,关彤军,张春会,等.海绵城市道路种植土—碎石绿化带的雨水入渗[J].中外公路,2018(2).
- [2] 郭振清,张春会,关彤军,等.海绵城市渗水雨水井新构造及入渗流量计算方法[J].中外公路,2019(1).
- [3] DREELIN E A, FOWLER L R, RONALD CARROLL. A

Test of Porous Pavement Effectiveness on Clay Soils during Natural Storm Events[J]. Water Research, 2006, 40: 799—805.

- [4] COLLINS K A, HUNT W F, HATHAWAY J M. Hydrologic Comparison of our Types of Permeable Pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 12 (13): 1 146—1 157.
- [5] D. G. Park, N. Sandoval, W. Lin, et al. A Case Study: Evaluation of Water Storage Capacity in Permeable Block Pavement, KSCE [J]. J. Civ. Eng., 2014, 18(2): 514—520.
- [6] Mengguang Zhu, Hao Wang, Lili Liu, et al. Preparation and Characterization of Permeable Bricks from Gangue and Tailings [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 484—491.
- [7] Yong Liu, Tian Li, Hangyu Peng. A New Structure of Permeable Pavement for Mitigating Urban Heat Island [J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1 119—1 125.
- [8] 唐双成,罗纨,贾忠华,等.填料及降雨特征对雨水花园削减径流及实现海绵城市建设目标的影响[J].水土保持学报,2016(1).
- [9] 宫永伟,戚海军,李俊奇,等.城市道路低影响开发设计的雨洪滞蓄效果分析[J].中国给水排水,2014(9).
- [10] 程树斌,张春会,关彤军,等.种植土—碎石绿化带雨水入渗的数值分析[J].河北科技大学学报,2019(1).
- [11] 关彤军,张春会,王雯,等.石家庄市道路径流雨水污染特征调查[J].河北科技大学学报,2017(6).
- [12] 肖海文,代蕾,任莉蓉,等.海绵城市雨水湿地的滞蓄容积设计与工程实例[J].中国给水排水,2018(18).
- [13] 蒋春博,李家科,马越,等.雨水花园对实际降雨径流的调控效果研究[J].水土保持学报,2018(4).
- [14] 宫永伟,张新勃,李慧文,等.济南市海绵城市建设试点区水量水质监测方案[J].中国给水排水,2017(11).
- [15] Joanna Fronczyk. Artificial Road Runoff Water Treatment by a Pilot—Scale Horizontal Permeable [J]. Ecological Engineering, 2017, 107: 198—207.
- [16] 蔡荣宝,杨晶晶.济南市分散式污水处理站提标改造案例分析[J].市政技术,2019(4).
- [17] 戴忱,陈凌.宜兴市基于水环境容量的海绵城市建设规划[J].中国给水排水,2018(18).
- [18] 由阳,朱玲,张洋,等.贵安新区海绵城市水量、水质三级控制屏障系统[J].中国给水排水,2018(16).
- [19] 王泽阳,关天胜,吴连丰.基于效果评价的海绵城市监测体系构建——以厦门海绵城市试点区为例[J].给水排水,2018(3).