

基于动态渗透的雨水塘下渗设计及运行方法

尹海龙, 解 铭, 徐祖信, 李怀正

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对上海世博城市最佳实践区北区的不透水景观水塘下渗改造, 开展了雨水滞留下渗现场试验研究. 改造前的试验表明, 雨水下渗速率与雨水塘-地下水水位差呈线性关系; 在改造后的雨水塘内开展试验, 进一步验证了该结论, 并确定了动态下渗速率. 因此, 提高塘内动态水位促进雨水下渗, 有助于实现园区 17.6 mm 雨水径流在 3 d 内被下渗利用, 达到国际绿色社区认证体系(LEED-ND)的铂金认证要求.

关键词: 雨水渗透塘; 下渗系数; 低影响开发; 国际绿色社区体系认证

中图分类号: TU992

文献标志码: A

Method for Design and Operation of Rainfall Infiltration Pond Based on Dynamic Seepage Coefficient

YIN Hailong, XIE Ming, XU Zuxin, LI Huazheng

(College of Environment Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking the transformation of an impermeable pond in the north urban best practices area (UBPA) of Shanghai World EXPO as an example, a field infiltration study was conducted. The experiment before the engineering indicated a linear relationship between the infiltration rate and water level gap (i.e., pond water level versus groundwater table), which was further verified by the experiments within the transformed infiltration pond. With the measured dynamic infiltration rate, it is presented that adjusting the pond water level dynamically is a practical approach to enhance runoff infiltration, critical in achieving 17.6 mm UBPA runoff reuse or infiltration within three days, certified by LEED-ND platinum grade.

Key words: rainfall infiltration pond; infiltration coefficient; low impact development; Leadership in Energy and Environmental Design for Neighborhood Development(LEED-

ND) Certification

城市化进程中不透水面积增加, 导致雨水径流量增加, 引发了城市内涝等问题. 采用分散式的就地渗透方法, 即低影响开发措施削减雨水径流, 已成为国内外雨洪控制利用工程实践中的重要技术手段, 具体实现方式包括下凹式绿地、雨水滞留塘(雨水花园)、渗透井、渗透地面、渗透管渠和植草沟渠等^[1-2].

在雨水下渗工程设计中, 土壤下渗能力是影响设计的关键因素. 已有研究认为土壤下渗能力受土壤理化性质、前期含水率和地下水水位等因素影响, 并提出了表征下渗速率的经验公式, 如 Horton 下渗公式等. 基于这一理论, 国内外学者在现场或室内模拟环境下, 对土壤下渗能力与土壤初始含水率、土地坡度以及不同土壤类型(耕地、林地和草地等)的关系进行了研究^[3-8]. 结合这些研究, 近年来在低影响开发的工程设计中, 国内外学者进一步开展了关于低影响开发设施的渗透能力测定试验、计算方法以及渗透设施的运行效果评估等方面的研究. 例如城市下凹式绿地等渗透设施蓄渗能力的计算方法^[9-12]、在绿地土壤层铺设渗透管材的城市小区绿地渗透试验研究^[13]、低影响开发设施(如透水铺装)下渗效果评估^[14-16], 以及相对较大长度上的区域或者城市排水系统在低影响开发前后的径流削减评估等^[17-20].

然而, 上述理论及设计方法的主要依据是采用双环法、环刀法、入渗土柱或者物理模型试验等方法, 对低影响开发设施的局部下渗能力分析, 侧重于低水头渗透设施的垂向稳定入渗(如渗透绿地); 实际工程运行中, 其下渗能力还可能与周边场地条件相关, 综合受到垂向和水平渗透交换能力以及场地地下水水位等的影响, 对此尚缺乏相关的现场试验

收稿日期: 2014-07-30

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2013ZX07304-002); 上海市研发基地建设项目(13DZ2251700); 上海市国际科技合作基金项目(13210701001)

第一作者: 尹海龙(1976—), 副教授, 工学博士, 主要研究方向为城市面源污染控制. E-mail: yinhailong@tongji.edu.cn

通讯作者: 徐祖信(1956—), 教授, 工学博士, 主要研究方向为城市面源污染控制. E-mail: xzx@stcsn.gov.cn

和下渗规律研究.

本文结合上海世博城市最佳实践区北区的雨洪利用与雨水下渗改造,开展雨水渗透塘现场下渗试验与工程设计研究,为类似雨水下渗工程设计改造提供借鉴.

1 研究对象简介

上海世博城市最佳实践区位于世博园区浦西部分,占地面积 16.85 hm²,包括北区和南区两个片区.在 2010 年世博会期间展示宜居家园、可持续的城市化和历史遗产保护与利用等内容.后世博时代,城市最佳实践区旨在打造一个充满活力的复合街坊和富有魅力的城市客厅.城市最佳实践区的建设目标是获得美国绿色建筑委员会颁发的 LEED-ND (Leadership in Energy and Environmental Design for Neighborhood Development) 铂金级认证,该认证是目前国际上最为先进和具有实践性的绿色建筑认证评分系统.

具体研究区域是城市最佳实践区的北区,面积 7.13 hm².根据 LEED-ND 铂金认证考核指标要求,日降雨量不大于 17.6 mm 时,园区雨水需在 3 d 内全部收集利用,包括在 3 d 内通过就地渗透的方式下渗利用.相应,北区 3 d 内的雨水收集利用量应满足 929 m³,其中:北区可利用雨水量每天为 89 m³(包括绿化灌溉、冲厕、道路及广场冲洗、洗车用水),3 d 利用水量为 267 m³;因此还有 662 m³ 雨水需要在 3 d 内就地下渗.

2010 年上海世博会期间,在城市最佳实践区的北区内设计展示了一个微缩版的成都活水公园案例,提出利用成都活水公园的水流循环系统蓄水,并将活水公园内的荷花池进行下渗改造,改造成雨水滞留塘,实现本区域收集的雨水在 3 d 内就地下渗,总体设计思路如图 1 所示,其中:北区调蓄池、清水池的总容积 274 m³,满足 3 d 内回用水量的蓄水要求;沉淀池、景观鱼眼、人工小溪、荷花池的总容积 701 m³,满足 3 d 内下渗水量的蓄水要求,并最终通过荷花池就地下渗.

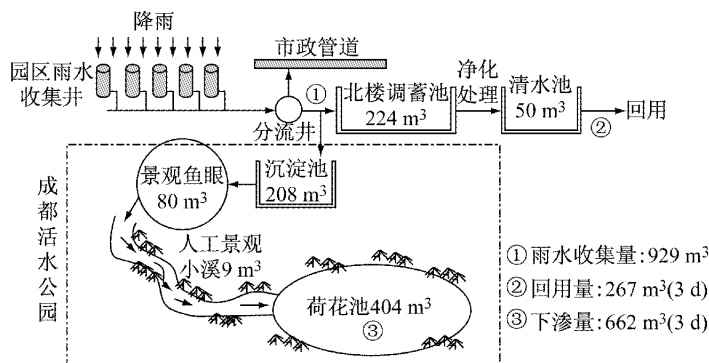


图1 城市最佳实践区北区雨水利用示意图

Fig.1 Scheme of rainfall runoff use and infiltration in north UBPA of Shanghai World EXPO

2 雨水塘下渗能力计算基本原理

雨水渗透塘下渗能力计算公式可表示为

$$Q = vA \quad (1)$$

式中: Q 为雨水下渗量; A 为雨水塘下渗接触面积; v 为雨水塘下渗速率,根据达西定律可表示为

$$v = kJ = k \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (2)$$

式中: k 为土壤介质的渗透系数; J 为水力坡度; H_1 为雨水塘水位; H_2 为某一监测地点的地下水水位; L 为雨水渗透塘与地下水水位监测点之间的距离(即对于 H_1, H_2 两点水头差的平面距离).

雨水下渗过程中,首先是垂向下渗至地下含水

层,其次是在地下含水层中水平扩散.垂向下渗时, $H_1 - H_2 = L$ (即水力坡度等于 1),因此垂向下渗速率等同于雨水渗透塘池底至含水层之间的基质渗透速率(天然基质或者局部人工改造后的基质渗透速率),即垂向下渗时

$$Q = kA \quad (3)$$

垂向下渗能力与垂向土层的渗透系数相关,与水位差无关;而水平向扩散能力,既与水平向土层的渗透系数相关,也与水位差(或水力坡度)相关.

尽管雨水塘下渗能力在理论上可以用式(3)表示,但是对于水平方向上渗透能力,难以直接用公式准确计算,因为场地周围基质的各向异性明显时,难以准确获取水平方向上的基质渗透速率.例如在本研究区域,表层土质为人工回填土,必然有明显的基

质渗透速率空间各向异性。此外,雨水下渗过程中水流在平面方向上向四周分散,水平方向上的水力坡降也具有明显的不确定性。对于雨水渗透塘的雨水下渗能力分析,仍然需要通过现场试验和工程实际运行验证,分析其雨水下渗参数和影响因素,总结工程设计运行方法。

3 雨水下渗改造前的现场试验研究

荷花池下渗改造前,进行了两次现场下渗试验,确定雨水下渗速率。两次试验分别如图 2a 和图 2b 所示。

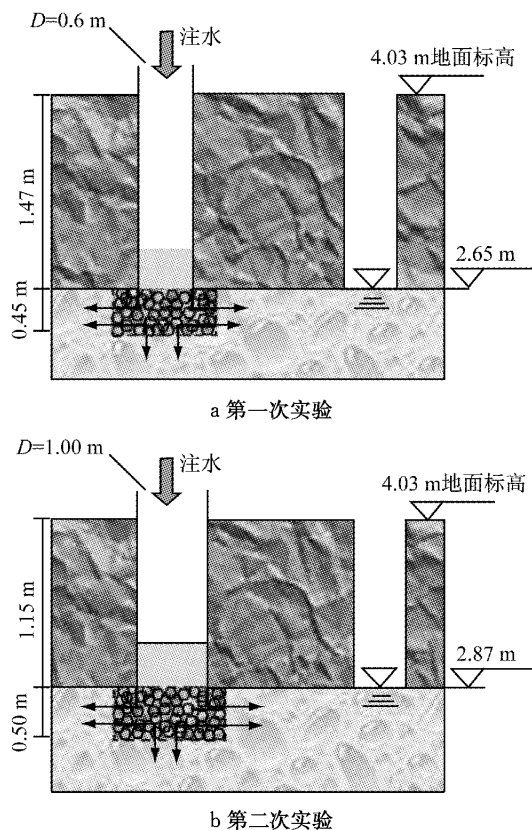


图2 雨水塘改造前的现场下渗试验示意图

Fig.2 Sketch map of on-site infiltration experiment before rainfall infiltration pond transformation

第一次试验在 2013 年 5 月 30 日—5 月 31 日。在荷花池外的附近区域开孔挖深,平面尺寸为 2.0 m×1.0 m,距离地面深度 1.92 m,在坑底铺 0.45 m 厚碎石。然后在上部埋置一个直径 0.60 m 的开口圆筒。圆筒与开孔之间的缝隙用回填土填充。在筒内灌水,观测其下渗速率。试验前期连续晴天,地下水水位为 2.65 m。

第二次试验在 2013 年 6 月 8 日—6 月 9 日。在荷花池岸边,另选一位置开展现场下渗试验。试验前

一天发生强降雨(前日降雨量为 70.80 mm),试验当日地下水水位由 2.65 m 上升至 2.87 m,相应开孔深度较第一次试验降低,距离地面 1.65 m;由于采用抓斗机回填碎石,第二次试验碎石回填量较第一次略多,坑底碎石铺设厚度为 0.50 m。此外,根据第一次下渗试验,并考虑圆筒内水位下降较快,第二次实验采用了较大的圆筒(直径 1.00 m)进行注水。

需要说明的是,尽管两次试验的参数有所不同,通过计算出下渗有效接触面积,将下渗水量换算成单位面积的下渗速率,两次试验参数具有可比性。试验结果如图 3a 和图 3b 所示。在注水量一定的条件下,圆筒内水位到达一定高度时,下渗水量和注水量相等,水位稳定在某一高度;随后停止注水,观察水位高度随时间的变化。第一次试验开始时的下渗起始水位高度为 2.84 m;第二次试验开始时,另外调换一台功率大的水泵,注水量加大,下渗试验起始水位高度增加至 3.45 m。从图 3 可以看出:圆筒内水位下降速率随时间逐渐减缓,并趋向于稳定。这一现象与圆筒内水位和地下水水位之间的水位差有关,试验初期,水位差大,下渗速率快;随着水位差的降低,下渗速度逐渐减缓;当圆筒内水位接近于地下水水位时,停止下渗。第一次试验时,90 min 后水位基本稳定在 2.65 m 左右不再下降;第二次试验时,45 min 后水位稳定在 2.90 m 左右不再下降。

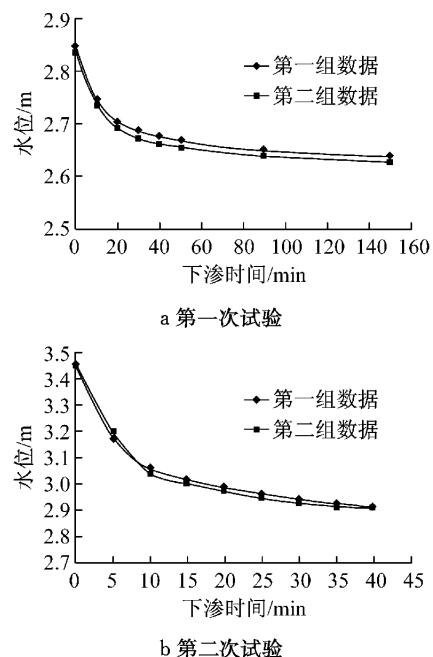


图3 雨水塘改造前的现场下渗试验水位动态变化

Fig.3 Water level variation with time before rainfall infiltration pond transformation

根据式(1)计算出两阶段试验的动态下渗速率

$$v = Q/A \quad (4)$$

式中: Q 为圆筒内对应某一水位标高的动态下渗流量; A 为下渗接触面积, 即碎石层与土壤接触面积, 见图 2, 两次试验分别为 4.70 m^2 , 5.00 m^2 ; v 为综合反映垂向下渗和水平向渗透扩散的实际下渗能力. 两次试验的动态下渗速率如表 1 示. 由于两次试验的地下水水位不同, 为具有可比性, 将两次试验测定结果进一步表示为下渗速率-水位差(圆筒水位与地下水水位之间的差值)之间的关系, 如图 4 示.

表 1 雨水塘改造前现场下渗速率

Tab.1 Calculated infiltration rate based on the on-site experiment before rainfall pond transformation

实验	第一组	第二组	平均下渗 速率/(10^{-6} $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水位 标高/ m	
时间/ min	下渗速率/ (10^{-6} $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	下渗速率/ (10^{-6} $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			
第一次试验	10	4.71	4.31	4.51	2.75
	20	1.60	1.90	1.70	2.70
	30	1.20	1.10	1.15	2.69
	40	1.00	0.80	0.90	2.67
	50	0.43	0.40	0.40	2.66
	90	0.17	0.22	0.19	2.65
第二次试验	10	21.70	22.30	22.00	3.06
	15	17.30	15.00	16.10	3.02
	20	13.90	12.20	13.10	2.98
	25	11.10	11.70	11.40	2.96
	30	8.90	8.40	8.60	2.94
	35	8.50	7.20	8.40	2.92
	40	5.00	3.90	4.40	2.91
	45	1.10	1.10	1.10	2.90

从图 4 可以看出: 下渗速率随着水位差的增加而线性增加. 这表明, 该研究中决定雨水蓄渗设施渗透能力的关键因素是水平方向的扩散交换能力. 其原因在于: 上海地区降雨量丰富, 地下水水位较高, 因此降雨入渗后水平方向渗透能力低于垂向渗透能力, 水平向渗透扩散成为制约雨水下渗塘渗透能力的关键因素. 需要指出的是, 目前在雨水渗透设施的设计规范中^[9-10], 通常采用垂向下渗能力的计算方式, 即下渗水量等于集水区面积与垂向稳定渗透系数乘积, 而不考虑水平方向上的扩散交换能力, 也就是不考虑蓄渗设施水位和地下水水位之间的动态变化对渗透能力的影响. 在我国南方地区, 降雨量充沛, 地下水水位较高, 这一计算模式难以反映实际下渗特征; 因此, 应通过现场试验, 确定符合当地实际情况、综合反映垂向下渗与横向扩散交换能力的下渗能力动态关系曲线, 为工程设计提供依据.

如图 4 所示, 第二阶段的下渗速率较第一阶段明显增加, 原因是世博园区场地的表层土质为人工

回填土, 含有较多的建筑垃圾, 渗透系数的空间各向异性较为明显. 由于两次试验分别选择了两个不同地点, 渗透试验场地面积较小, 水流下渗的局部短流效应会更加明显, 因此两次试验下渗速率明显差异. 按照最不利原则, 取较小的下渗速率作为荷花池改造的设计参数.

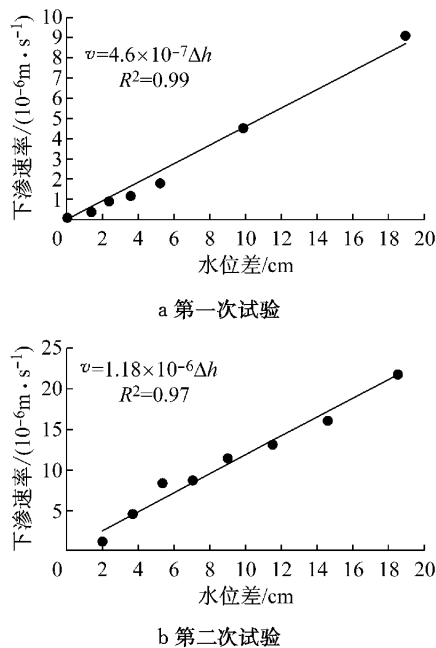


图 4 现场下渗速率与水位差的关系

Fig.4 Relationship between infiltration rate and surface water-groundwater level gap

4 雨水下渗改造方案

现状荷花池的池底标高为 3.0 m , 为满足景观要求, 底部需保持 0.2 m 的水层种植景观植物, 即最低水位标高 3.2 m , 最高水位根据荷花池深要求控制在 4.0 m . 考虑到降雨期间地下水水位上升, 从保守设计的角度, 地下水水位取值为 3.0 m , 与荷花池的不透水底板持平. 相应, 荷花池内水位与地下水水位之间的水位差为 $0.2 \sim 0.8 \text{ m}$, 平均为 0.5 m . 以平均水位差 0.5 m 为基准值, 根据前述试验结果(图 4a), 下渗速率计算为 $2.3 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

最佳实践区北区 662 m^3 雨水需在 3 d 内通过荷花池全部下渗, 平均下渗流量为 $2.55 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 因此, 根据式(1)计算出所需的渗透接触面积为 111 m^2 .

据此, 最佳实践区北区荷花池的改造方案最终为: 将荷花池西北部区域 $17.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ 面积的不透水底板全部凿开, 在池底部以下铺上 $17.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高) 的碎石层. 碎石层铺设

后,在其上部设置直径为 0.60 m 的 11 根下渗导管,然后用混凝土重新浇筑封闭.下渗管设有盖板,可人工启闭.需要下渗时,盖板打开,荷花池内的水通过下渗管引入碎石层中下渗;如果连续晴天不降雨,为保持荷花池内的景观用水,则将下渗管上部的盖板关闭.该方案的渗透接触面积为 115 m²,满足下渗所需的渗透接触面积要求.荷花池改造方案如图 5 所示,图中数字为入渗孔编号.

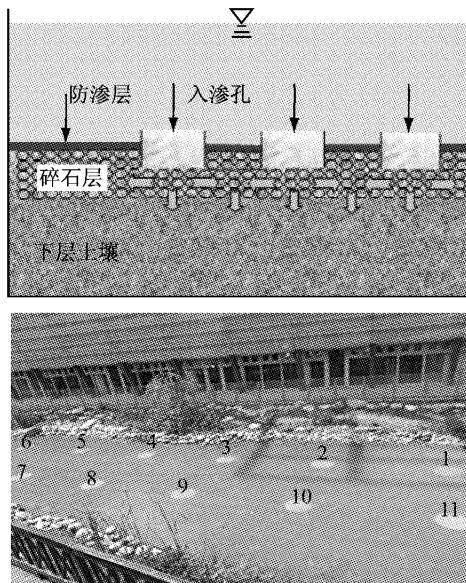


图 5 雨水塘底部下渗改造示意图

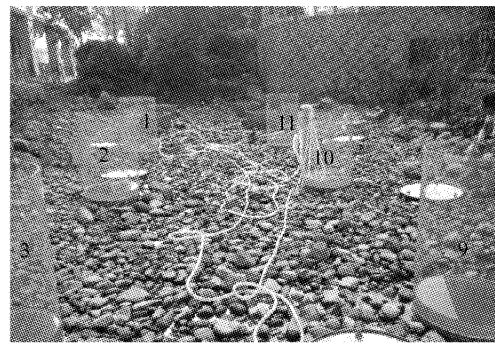
Fig.5 Sketch map of rainfall infiltration pond transformation

5 雨水下渗改造后的现场试验验证

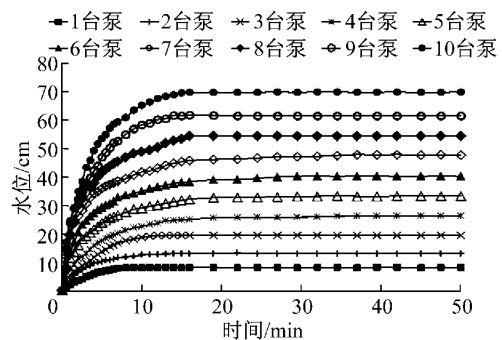
5.1 改造后的下渗速率验证

改造后的荷花池实际下渗速率验证试验时间为 2013 年 8 月 9 日—8 月 13 日.如图 6a 所示,试验前将荷花池内的水排干,在荷花池下渗导管上方安装高度为 1.0 m 的有机玻璃柱,开展注水实验.注水量由便携式的小型潜水泵控制,单台流量为 1.5 m³ · h⁻¹;最多时采用 10 台潜水泵同时供水(流量 15.0 m³ · h⁻¹),相应分为 10 种试验工况(1.5~15.0 m³ · h⁻¹).试验前期,为模拟降雨条件下的地下水水位,荷花池持续通过人工补水的方式下渗运行,荷花池底部含水层处于饱和状态,地下水水位与不透水底板基本持平,即地下水水位约为 3.0 m;相应,荷花池水深基于等于荷花池水位和地下水水位之间的水位差.针对向单个有机玻璃圆筒注水的情形,不同流量条件下,有机玻璃筒内水深动态变化如图 6b 示.

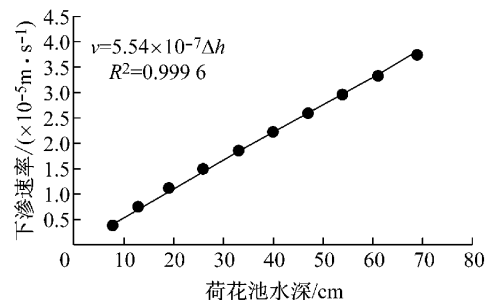
试验初期注水流量大于下渗流量,有机玻璃筒的水位逐渐上升.随着水位上升,下渗速率逐渐增



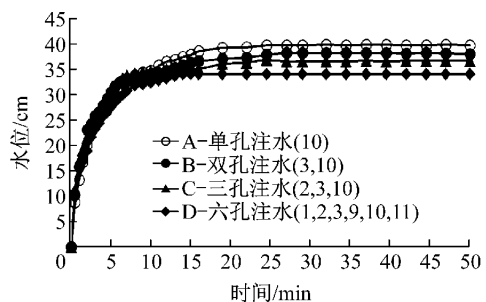
a 现场试验示意图



b 单个下渗孔注水下渗时有机玻璃柱水深随时间变化



c 单个下渗孔下渗时的下渗速率与水头差关系



d 多个下渗孔注水下渗时的下渗速率比较(9 m³/h)

图 6 雨水塘改造后现场下渗试验结果

Fig.6 Experimental results from the transformed rainfall infiltration pond

加;当下渗流量等于注水流量时,有机玻璃柱的水位趋于稳定,此时就可计算某一水位高度对应的下渗速率.进一步绘制荷花池的地下水水位差与下渗速率的对应关系,如图 6c 所示,并拟合出下渗速率与水头差之间的关系式为: $v=5.54 \times 10^{-7} \Delta h$.与改造

前的雨水下渗速率函数关系式相比,该试验结果略大于改造前的第一次试验结果(图4a),明显低于改造前的第二次试验结果(图4b)。这是因为荷花池改造运行后,下渗接触面积以及相应向四周扩散的面积较第一阶段试验明显增加,总体上渗透系数的空间各向异性降低,水流流动的短流效应也降低,因此下渗速率低于第二次试验的结果。

如图6d示,在相同的注水水量($9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)条件下,同时向多个有机玻璃筒注水时的稳定水深,要低于向一个有机玻璃筒注水时的稳定水深。这表明,同时向多个下渗孔注水时,水流通过碎石层下渗扩散的途径更为畅通,相应下渗速率有所增加。

总体上,下渗孔开启的数目越大,下渗速率相应也就越快。因此,在利用改造后的荷花池下渗雨水时,为提高下渗速度,原则上可将下渗孔全部打开。

5.2 改造后的下渗能力验证

在2013年12月29日—2014年1月1日,开展了第二次验证实验。目的是验证荷花池能否在3 d时间内下渗 662 m^3 雨水,达到设计目标要求。由于城市最佳实践区北区的雨水收集回用系统较为复杂,涉及楼宇内调蓄池建设以及成都活水公园进水系统的全面改造等,尚未建设完成,不具备收集该区域雨水下渗的条件。然而,需要预先评估荷花池改造后的实际下渗能力,为后续的雨水收集系统建设和活水公园改造提供依据,例如根据实际下渗能力调整楼宇内调蓄池容积和回用水量等。

试验方法为利用荷花池附近的消防龙头直接向荷花池中注水,流量为 $15.52 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。试验起始时的荷花池地下水水位约为 3.00 m ,与第一次验证试验的本底地下水水位值基本相同。试验前将荷花池内的存水用水泵排干,并将荷花池底部的下渗孔全部打开,之后利用消防龙头向荷花池中注水,试验时间为2013年12月29日11:25—2014年1月1日3:00,下渗试验结果如图7所示。

初始时间段,荷花池注水流量大于下渗流量,荷花池中水位逐渐上升;当荷花池水深到 42 cm 时(2013年12月30日2:00),注水量等于下渗量,水深接近稳定,即荷花池水深 42 cm 时,下渗能力为 $15.52 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。与改造后的第一次验证试验相比,当只打开1个下渗孔时,对应荷花池水深 42 cm 时的下渗能力为 $9.43 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,明显低于本次试验的下渗能力,原因是本次实验中,11个下渗孔全部打开,水流下渗通道相应增加。这进一步验证了第一次验证试验时的结论。

在荷花池水位稳定后,持续向荷花池中供水至12月31日6:00,累积注水时间为 42.48 h ,注水量为 662 m^3 ,注水结束时水深为 42.3 cm ,基本保持不变。这表明荷花池在长时间通水运行条件下,具有稳定的向周边交换扩散的能力。这在一定程度上与场地的土质条件有关:最佳实践区表层土是人工回填土,其中含有碎石、建筑垃圾等,孔隙相对较大,因而雨水通过荷花池下渗后,与周边的水力交换条件较好,水平扩散相对较快。

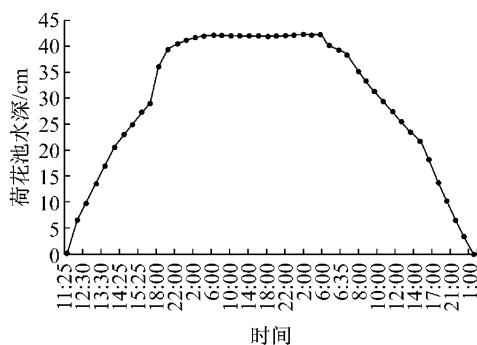


图7 改造后荷花池实际下渗能力验证

Fig. 7 Test of actual rainfall pond infiltration capacity to meet LEED-ND requirement

当停止向荷花池供水后,荷花池中水位逐渐下降,至2014年1月1日3:00,荷花池内的水全部下渗完毕。整个试验过程历时 63.58 h ,满足 72 h 内全部下渗的要求。

实际上,试验得到的是一个相对较为保守的下渗时间:①试验开始时荷花池内全部放干,如前所述,如果考虑荷花池需保持 0.20 m 的景观水深,则雨水下渗时的荷花池运行水位会进一步提高,相应下渗速率也会提高;②试验条件下的供水水量为 $15.52 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ($4.3 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$),如果向荷花池中的注水量进一步提高,荷花池稳定水深随之增加,相应下渗速率也会更快,所需下渗时间也会相应缩短。

综上所述,将成都活水公园内的荷花池改造成雨水滞留塘,实现最佳实践区北区收集的 662 m^3 雨水在3 d内下渗,是可行的。

6 结论

(1)在基于低影响开发的城市雨水下渗塘设计中,雨水下渗速率不仅与垂向下渗有关,也与水平方向上的扩散交换能力有关。当研究区域降雨量丰富、地下水水位较高时(如我国南方地区),降雨入渗后水平方向的扩散交换能力将会成为决定雨水蓄渗设

施能否长时间稳定运行的关键因素。现场试验表明,总体上雨水渗透塘的下渗能力与运行水位和地下水水位之间的水头差成线性关系,水头差越大,雨水下渗速率也就越大。因此,建议可采取调节雨水渗透塘水位动态运行的方式,提高雨水下渗能力,例如可考虑通过下渗孔的启闭调控维持雨水渗透塘在较深水头条件的下渗。

(2)目前的雨水蓄渗设施设计中多采用基于垂向下渗的稳定下渗速率来确定下渗能力,稳定下渗速率参数值的选择取决于下渗设施局部的土壤渗透系数,不考虑空间尺度上的地下水水平扩散能力以及考虑蓄渗设施动态水位变化的影响,设计参数的不确定性较大。建议在雨水蓄渗工程设计前,开展雨水下渗现场试验,确定当地的动态雨水下渗系数,尤其是针对当地地下水位较高、渗透设施较深运行水位条件下的下渗。

(3)基于低影响开发的雨水蓄渗工程设计尚无较多的实际工程经验可供借鉴,在雨水渗透塘建成运行后,有必要通过长时间的雨水下渗能力以及区域地下水水位的观测,进一步评估其运行效能,为工程设计积累经验。

参考文献:

- [1] 邢薇,赵冬泉,陈吉宁,等.基于低影响开发的可持续城市雨水系统[J].中国给水排水,2011,27(20):13.
XING Wei, ZHAO Dongquan, CHEN Jining, *et al.* Sustainable urban rainwater system based on low impact development[J]. China Water and Wastewater, 2011, 27(20): 13.
- [2] USEPA. Low impact development: a literature review[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [3] 杨珏,黄利群,李灵军,等.城市暴雨过程对下凹式绿地设计参数的影响研究[J].水文,2011,31(2):58.
YANG Jue, HUANG Liqun, LI Lingjun, *et al.* Impact of urban rainstorm process on design parameters of concave herbaceous field[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(2): 58.
- [4] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下黏质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871.
LIU Muxing, NIE Yan, YU Jing. The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 871.
- [5] 朱伟,陈学东,钟小春.降雨入渗规律的实测与分析[J].岩土力学,2006,27(11):1873.
ZHU Wei, CHEN Xuedong, ZHONG Xiaochun. Observation and analysis of rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 1873.
- [6] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40.
LI Zhuo, WU Pute, FENG Hao, *et al.* Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 40.
- [7] Olson N C, Gulliver J S, Nieber J L, *et al.* Remediation to improve infiltration into compact soils [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 117: 85.
- [8] Lei T W, Pan Y H, Liu H, *et al.* A run off-on-ponding method and models for the transient infiltration capability process of sloped soil surface under rainfall and erosion impacts [J]. Journal of Hydrology, 2006, 319: 216.
- [9] 张光义,聂发辉,宁静,等.城市下凹式绿地长期运行蓄渗效率的概率分析[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(5):651.
ZHANG Guangyi, NIE Fahui, NING Jing, *et al.* Probability analysis of storage-infiltration efficiency of urban concave-down greenbelt under long-term operation condition[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(5): 651.
- [10] 程江,徐启新,杨凯,等.下凹式绿地蓄渗效应及其影响因素[J].给水排水,2007,33(5):45.
CHENG Jiang, XU Qixin, YANG Kai, *et al.* Rainfall penetration and storage effect and influencing factors of sunken green space[J]. Water and Wastewater Engineering, 2007, 33(5): 45.
- [11] 中华人民共和国建设部. GB500400—2006 建筑与小区雨水利用工程技术规范[S].北京:中华人民共和国建设部,2006.
Ministry of Construction of the People's Republic of China GB500400—2006 Engineering technical code for rain utilization in building and sub-district [S]. Beijing: Ministry of Construction of the People's Republic of China, 2006.
- [12] 深圳市市场监督管理局. SCDB/Z49—2011 雨水利用工程技术规范[S].深圳:深圳市市场监督管理局,2011.
Market Supervision and Ministration Bureau of Shenzhen SCDB/Z49—2011 Engineering technical code for rain utilization[S]. Shenzhen: Market Supervision and Ministration Bureau of Shenzhen, 2011.
- [13] 龚应安,陈建刚,张书函,等.城市小区绿地雨水下渗后收集利用技术研究[J].中国给水排水,2012,28(9):62.
GONG Yingan, CHEN Jiangang, ZHANG Shuhan, *et al.* Harvesting of infiltrated rainwater into green spaces in urban residential areas[J]. China Water and Wastewater, 2012, 28(9): 62.
- [14] Dreelin E A, Fowler L, Carroll C R. A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events [J]. Water Research, 2006, 40(4): 799.
- [15] Scholz M, Grabowlecki P. Review of permeable pavement systems [J]. Building and Environment, 2007, 42(11): 3830.
- [16] Bean E Z, Hunt W F, Bidelsbach D A. Field survey of permeable pavement surface infiltration rates [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007, 133: 249.
- [17] Liu Y Z, Ahiablame L M, Bralts V F, *et al.* Enhancing a rainfall-runoff model to assess the impacts of BMPs and LID practices on storm runoff [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 147: 12.
- [18] Hamel P, Daly E, Fletcher T D. Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanisation on baseflow [J]. Journal of Hydrology, 2013, 485: 201.
- [19] Qin H P, Li Z X, Fu G T. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129: 577.
- [20] Roldin M, Fryd O, Jeppesen J, *et al.* Modelling the impact of soakaway retrofits on combined sewage overflows in a 3 km² urban catchment in Copenhagen, Denmark [J]. Journal of Hydrology, 2012, 452/453: 64.