

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.002

海绵城市渗水雨水井新构造及入渗流量计算方法

郭振清¹, 张春会^{2,3*}, 关彤军³, 阎发泉⁴, 王芳¹(1.石家庄市市政建设总公司, 河北 石家庄 050000; 2.河北科技大学 建筑工程学院;
3.石家庄市政设计研究院有限责任公司; 4.石家庄市排水管理处)

摘要:为实现海绵城市建设目标,提出了一种由溢流容积、渗水容积、开孔透水混凝土底板和碎石透水井组成的渗水雨水井新构造,可用于老、旧小区道路改造。分析了雨水收集入渗雨水井的3种工况,在井内常水位条件下,建立了雨水从碎石透水井入渗砂层的瞬态渗流控制方程,结合初边值条件和积分变换方法给出了孔隙水压力和渗流流量的解析解。利用解析解分析了渗水雨水井内积水入渗地层的过程,结果表明:①文中解析解能计算雨水入渗地层过程中的孔压动态演化和入渗流量的动态演变过程;②稳定入渗水流量与渗透系数呈线性正比关系,入渗稳定所需时间与渗透系数呈线性反比关系;③文中解析解和简化公式可用于海绵城市渗水雨水井入渗流量计算。

关键词:海绵城市;雨水井;新构造;入渗流量

1 引言

为改善城市生态环境,减轻城市热岛效应和内涝灾害,2014年住房和城乡建设部发布了《海绵城市建设技术指南》,鼓励中国各个城市建设海绵城市。2015年,迁安、镇江、南宁等16个城市入选海绵城市建设试点城市。随后,海绵城市建设技术已被国内外学者广泛关注。在海绵城市建设技术方面,美国率先提出了

低影响开发的概念(Low Influence Development),随后一些国外学者先后研究了低影响开发建设技术。中国学者也先后对透水路面、植草沟、雨水花园、生物滞留带、下凹式绿地等海绵城市结构设施开展了研究。然而在城市中存在大量已建成小区,这些小区很难建设上述雨水入渗结构。如何通过简单改造在已建成小区实现海绵城市建设目标,对于海绵城市建设具有重要意义。为此,该文基于海绵城市理念,提出一种集雨水入渗、滞留为一体的新型雨水井构造,该雨水井可用

- [10] 吕凡任,邵红才,金耀华,对称双斜桩桩基础竖向承载力模型试验研究[J].工业建筑,2012(5).
- [11] 凌道盛,任涛,王云岗.砂土地基斜桩水平承载特性 $p-y$ 曲线法[J].岩土工程学报,2013(1).
- [12] 徐江,龚维明,张琦,等.大口径钢管斜桩竖向承载特性数值模拟与现场试验研究[J].岩土力学,2017(8).
- [13] 王新泉,陈永辉,安永福,等.塑料套管现浇混凝土桩倾斜对承载性能影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011(4).
- [14] 曹卫平,樊文甫.水平荷载作用下斜桩承载变形性状数值分析[J].中国公路学报,2017(9).
- [15] 曹卫平,夏冰,赵敏,等.砂土中水平受荷斜桩的 $p-y$ 曲

- 线及其应用[J].岩石力学与工程学报,2018(3).
- [16] 李吉人,宋波,吴澎.全直桩与斜桩高桩码头结构地震动力损伤对比研究[J].建筑结构学报,2016(7).
- [17] 周德泉,周果子.一种加固倾斜软基的组合型复合地基:中国,ZL201621328014.7[P],2017-04-27.
- [18] 周德泉,罗坤,冯晨曦,等.一种室内土工模型实验装置:中国,ZL201520323607.3[P],2015-08-26.
- [19] 周德泉,谭焕杰,徐一鸣,等.循环荷载作用下花岗岩残积土累积变形与湿化特性试验研究[J].中南大学学报:自然科学版,2013(4).
- [20] 周德泉,颜超,罗卫华.复合桩基重复加卸载过程中侧向约束桩变位规律试验研究[J].岩土力学,2015(10).

收稿日期:2018-05-20(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51574139);河北省重点科技研发项目(编号:18276109D,15275409D)

作者简介:郭振清,男,大学本科,高级工程师.E-mail:623160637@qq.com

* 通信作者:张春会,男,教授.E-mail:zhangchunhui789@126.com

于老、旧小区道路改造工程中,实现老、旧小区雨水收集和入渗,达到海绵城市建设目标。为了推广应用该雨水井,需推导该雨水井设计入渗雨流量计算公式。

2 渗水雨水井新构造

该文的基于海绵城市理念的渗水雨水井构造如图 1 所示。雨水井井壁为钢筋混凝土,上盖为钢制格栅,下为开孔透水混凝土底盖,开孔透水混凝土下铺碎石层,下接透水碎石井,透水碎石井与良性透水层相通。降落于小区道路的雨水经横坡收集,由钢制格栅进入雨水井,然后渗透通过开孔透水混凝土、碎石层,入渗至透水碎石井,再渗透至良性透水砂层,进入地下。雨水井容积由渗水容积和溢流区容积两部分组成。渗水容积内的雨水将通过开孔透水混凝土、碎石层和透水碎石井入渗至地基土内。若降雨量较大,存储雨水达到溢流区,溢流区内的雨水将直接通过排水管道排除,防止雨水井雨水溢满。为了防止雨水入渗淤堵开孔透水混凝土底盖,为开孔透水混凝土底盖制作底盖钢筋拉杆,1~2 年将开孔透水混凝土底盖提拉至地面,清洗后再重新安放雨水井内。

3 入渗雨量计算方法

雨水通过该文雨水井入渗地下有 3 种工况。工况 1:若降雨小,收集的雨量少,至雨水井后快速入渗地下,降雨全部收集,雨水井收集雨量即为入渗雨量;工况 2:降雨较大,收集雨水在雨水井内积存,但最大积存高度不及溢流区,雨水也将逐渐入渗至地基土内,降雨全部收集,雨水井收集雨量即为入渗雨量。工况 3:降雨大,收集雨水在雨水井内积存,最大积存高度超过溢流线,发生了溢流,部分雨水通过雨水管道排除。入渗雨量就是雨水井水位为溢流区下界面条件下透水碎石井的入渗流量。这一值也是雨水井的最大入渗雨水量,是选择井形、确定井间距的依据,也是评估海绵城市建设是否达到设计目标的基础。

为此,在雨水水位为溢流区位置条件下计算透水碎石井的入渗流量。透水碎石井内碎石对水流动有阻力,在计算时综合考虑,取碎石井高度作为计算碎石井下部边界的水头边界条件,如图 1 中 H 。

碎石井半径为 r_w ,良性透水砂层厚度为 h ,雨水入渗良性透水砂层可简化为如图 2 所示。

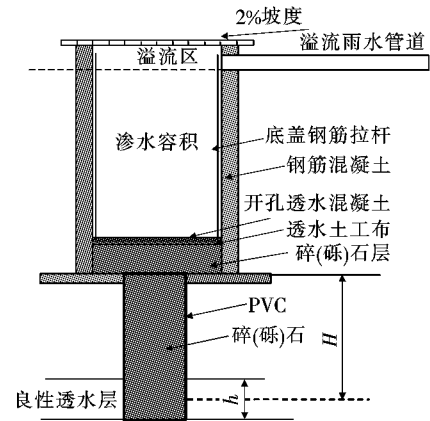


图 1 渗水雨水井构造

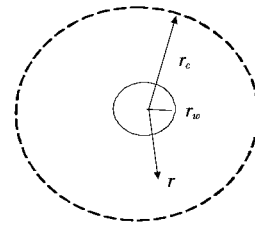


图 2 计算模型

假设良性透水砂层为各向同性介质,通过透水碎石井向透水砂层渗水的控制方程为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (r_w < r < r_c) \quad (1)$$

式中: p 为水压力; $\lambda = K/(\Phi\gamma_w c_t)$; r_w 为砂井半径; r_c 为良性透水层远端半径; K 为渗透系数; Φ 为孔隙度; γ_w 为水的密度; c_t 为扩散系数。若水视作不可压缩, c_t 可视为土体孔隙压缩系数。

初、边值条件可表示为:

$$p = p_w \quad r = r_w, t > 0 \quad (2a)$$

$$p = p_c \quad r = r_c, t > 0 \quad (2b)$$

$$p(r, t=0) = p_0 \quad t=0 \quad (2c)$$

对边界条件(2a)和(2b)进行齐次化处理,设:

$$p(r, t) = V(r, t) + W(r) \quad (3)$$

把式(3)代入式(1)、(2),求得 $W(r)$ 的形式为:

$$W = \frac{p_c - p_w}{\ln r_c - \ln r_w} \ln r + \frac{p_w \ln r_c - p_c \ln r_w}{\ln r_c - \ln r_w} \quad (4)$$

于是,式(1)、(2)可写为:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \quad (r_w < r < r_c) \quad (5)$$

$$V|_{r=r_w} = 0, V|_{r=r_c} = 0 \quad (6a)$$

$$V(r, t=0) = p_0 - W(r) \quad (6b)$$

使用分离变量法, V 表示为:

$$V = V(t)R_0(r) \quad (7)$$

其中:

$$V(t) = \exp(-\lambda \beta_m^2 t) \quad (8)$$

$R_0(\beta, r)$ 为以下特征值问题的解:

$$\frac{d^2 R_0}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dR_0}{dr} + \beta_m^2 R_0 = 0 \quad (r_w < r < r_c) \quad (9)$$

$$R_0|_{r=r_w} = 0, R_0|_{r=r_c} = 0 \quad (10)$$

由积分变换, 有:

$$V(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_0(\beta_m, r)}{N(\beta_m)} e^{-\lambda \beta_m^2 t} \int_{r_w}^{r_c} r' R_0(\beta_m, r') [p_0 - W(r)] dr' \quad (11a)$$

$$R_0 = N_0(\beta_m r_c) J_0(\beta_m r) - J_0(\beta_m r_c) N_0(\beta_m r) \quad (11b)$$

$$\frac{1}{N(\beta_m)} = \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{\beta_m^2 J_0^2(\beta_m r_w)}{J_0^2(\beta_m r_w) - J_0^2(\beta_m r_c)} \quad (11c)$$

式中: J_0 为第一类 0 阶贝塞尔函数; N_0 为第二类 0 阶贝塞尔函数。

式(11)中 β_m 为下方方程的解:

$$J_0(\beta_m r_w) N_0(\beta_m r_c) - J_0(\beta_m r_c) N_0(\beta_m r_w) = 0 \quad (12)$$

则, $p(r, t)$ 为:

$$p(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_0(\beta_m, r)}{N(\beta_m)} e^{-\lambda \beta_m^2 t} \int_{r_w}^{r_c} r' R_0(\beta_m, r') [p_0 - W(r)] dr' + \frac{p_c - p_w}{\ln r_c - \ln r_w} \ln r + \frac{p_w \ln r_c - p_c \ln r_w}{\ln r_c - \ln r_w} \quad (13)$$

根据贝塞尔函数性质, 式(13)中积分项可以表示为:

$$M = \int_{r_w}^{r_c} r' R_0(\beta_m, r') [p_0 - W(r')] dr' = \int_{r_w}^{r_c} r' R_0(\beta_m, r') \left[p_0 - \frac{p_c - p_w}{\ln r_c - \ln r_w} \ln r' - \frac{p_w \ln r_c - p_c \ln r_w}{\ln r_c - \ln r_w} \right] dr' \quad (14)$$

式(14)写为:

$$M = P - Q \quad (15a)$$

$$P = \int_{r_w}^{r_c} r' R_0(\beta_m, r') \left[p_0 - \frac{p_w \ln r_c - p_c \ln r_w}{\ln r_c - \ln r_w} \right] dr' = p_{01} \left\{ \frac{1}{\beta_m^2} N_0(\beta_m r_c) [\beta_m r' J_1(\beta_m r')] \right|_{r_w}^{r_c} - \frac{1}{\beta_m^2} J_0(\beta_m r_c) [\beta_m r' N_1(\beta_m r')] \right|_{r_w}^{r_c} \left. - \frac{p_{01}}{\beta_m^2} \{ N_0(\beta_m r_c) [\beta_m r_c J_1(\beta_m r_c) - \beta_m r_w J_1(\beta_m r_w)] - J_0(\beta_m r_c) [\beta_m r_c N_1(\beta_m r_c) - \beta_m r_w N_1(\beta_m r_w)] \} \right\} \quad (15b)$$

式中: J_1 为第一类 1 阶贝塞尔函数; N_1 为第二类 1 阶

贝塞尔函数。

$$p_{01} = \left[p_0 - \frac{p_w \ln r_c - p_c \ln r_w}{\ln r_c - \ln r_w} \right] \quad (15c)$$

$$Q = \int_{r_w}^{r_c} r' R_0(\beta_m, r') \frac{p_c - p_w}{\ln r_c - \ln r_w} \ln r' dr' =$$

$$\int_{r_w}^{r_c} r' R_0(\beta_m, r') p_{02} \ln r' dr' = \frac{p_{02} N_0(\beta_m r_c)}{\beta_m^2} [\beta_m r_c \ln r_c J_1(\beta_m r_c) - \beta_m r_w \ln r_w J_1(\beta_m r_w) + J_0(\beta_m r_c) - J_0(\beta_m r_w)] - \frac{p_{02} J_0(\beta_m r_c)}{\beta_m^2} [\beta_m r_c \ln r_c N_1(\beta_m r_c) - \beta_m r_w \ln r_w N_1(\beta_m r_w) + N_0(\beta_m r_c) - N_0(\beta_m r_w)] \quad (15d)$$

$$p_{02} = \frac{p_c - p_w}{\ln r_c - \ln r_w} \quad (15e)$$

代入式(13), $p(r, t)$ 的解为:

$$p(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_0(\beta_m, r)}{N(\beta_m)} e^{-\lambda \beta_m^2 t} M + \frac{p_c - p_w}{\ln r_c - \ln r_w} \ln r + \frac{p_w \ln r_c - p_c \ln r_w}{\ln r_c - \ln r_w} \quad (16)$$

其入渗水流量为:

$$Q = 2\pi r h K \frac{dp}{dr} / \gamma_w \quad (17a)$$

由式(16)有:

$$\frac{dp}{dr} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R'_0(\beta_m, r)}{N(\beta_m)} e^{-\lambda \beta_m^2 t} M + \frac{1}{r} \frac{p_c - p_w}{\ln r_c - \ln r_w} \quad (17b)$$

由式(11b), 有

$$R'_0 = N_0(\beta_m r_c) J_{-1}(\beta_m r) \beta_m - J_0(\beta_m r_c) N_{-1}(\beta_m r) \beta_m \quad (17c)$$

式中: J_{-1} 和 N_{-1} 分别为 -1 阶第一类和第二类贝塞尔函数。

利用式(16)可以计算渗水雨水井雨水入渗过程中透土层内的孔压演化, 式(17)可以计算相应的渗水水量。

笔者在 Matlab 下编制了相应的计算程序。

4 计算实例

4.1 计算实例

以石家庄市北二环某小区海绵城市建设概化为算例进行研究。良性透水层为粗砂层, 距渗水透水井井底埋深 $H = 9.0$ m, 透水层厚度 $h = 3.0$ m, 孔隙度 $\Phi = 0.3$, 透水层水平无限展布, 粗砂层的压缩系数为 0.037 5 MPa^{-1} , 渗透系数为 2.0×10^{-4} m/s, 透水碎石井半径 $r_w = 0.25$ m, $\lambda = 1.78 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

计算外半径取透水碎石井半径的 100 倍,该试验表明:计算外半径已足够大。由于透水砂层水平无限展布,透水砂层渗透系数较大,计算外半径边缘水压力为 0。工程实际中,通常雨水井内不积水。因此该文假设初始时刻无降雨,也无雨量流入,透水碎石井内无蓄储雨水,透水碎石井边缘处(与砂层交界)孔压为 0,视作饱和。

利用式(16)、(17)获得雨水入渗透水层的孔压演化和流量演化如图 3、4 所示。

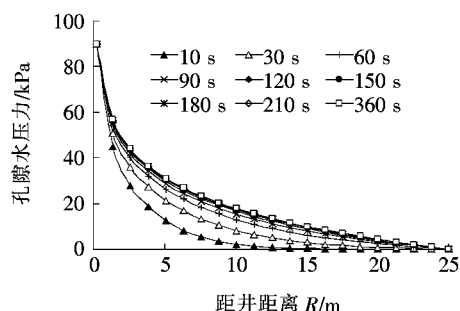


图 3 雨水入渗透水砂层的孔压演化

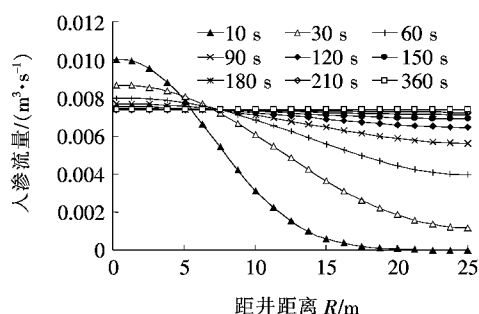


图 4 雨水入渗透水砂层的流量演化 ($K=2.0 \times 10^{-4}$ m/s)

从图 3 可以看出:① 在透水井边缘,孔压最大,离开透水井,孔压逐渐降低;② 对于砂性透水层而言,随着时间增加,孔压和雨水入渗快速趋于稳定,在 360 s 时,孔压在透水砂层内的分布基本稳定,表明雨水入渗基本趋于稳定。

从图 4 可以看出:① 在雨水入渗透水砂层的初始阶段,透水砂井边缘处入渗流量最大,离开透水砂井入渗流量逐渐减小,由于雨水尚未流动至远处,在远处基本为 0;② 随着时间增加,入渗流量渐趋恒定,在 360 s 时入渗流量约为 $0.0074 \text{ m}^3/\text{s}$,每小时可渗入流量 $26.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

综上可知:由于砂层渗透性大,雨水入渗砂层快速达到稳定状态。为了方便估计透水砂层雨水入渗流量,可采用式(18)计算入渗流量:

$$Q=2\pi r_w h K H / k_s \quad (18)$$

式中: k_s 为调整系数。

将由式(17)得到的人渗雨水量($0.0074 \text{ m}^3/\text{s}$)代入式(18),可以推得 $k_s=1.15$ 。

从式(18)也可以看出:入渗透水砂层的流量与碎石透水井半径、高度及透水砂层厚度成正比。

4.2 渗透系数的影响

从上述算例可以看出:若砂层的渗透系数大,式(1)中 λ 大,雨水入渗砂层可快速达到稳定状态,可以使用简化公式(18)估算入渗流量。若渗透系数不够大的情形如何呢?

变化算例 4.1 节中的渗透系数。渗透系数分别取 0.4×10^{-4} 、 0.2×10^{-4} 、 $0.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。利用式(18)获得入渗流量演化如图 5 所示。

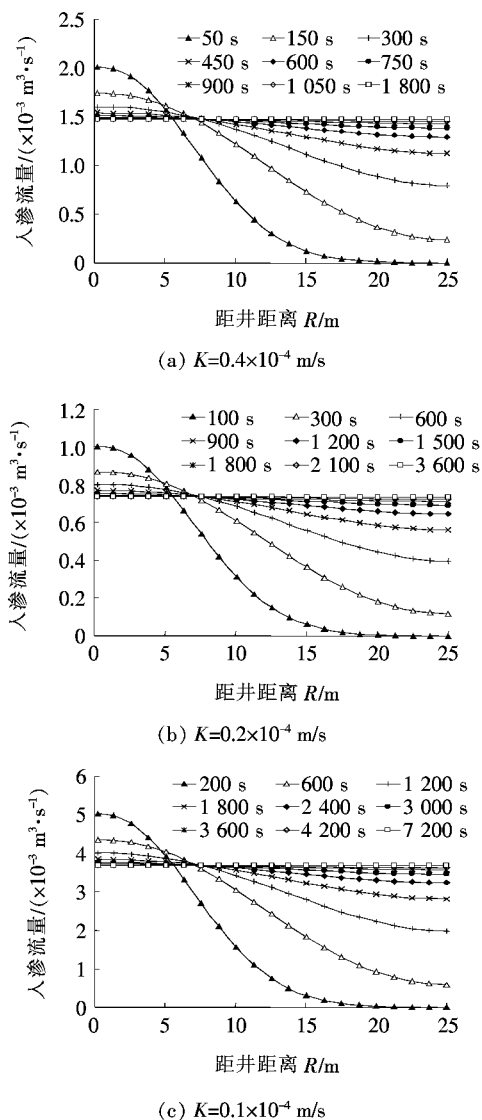


图 5 不同渗透系数时雨水入渗透水砂层的流量演化

由图 5 可以看出:随着渗透系数减小,稳定入渗时的入渗水量近似线性减小,渗流稳定所需的时间近似线性增加。在 $K=2.0 \times 10^{-4}$ m/s 时(以下简称第一种工况),稳定入渗水量约为 $0.0074 \text{ m}^3/\text{s}$,入渗稳定所需时间约为 360 s; $K=0.4 \times 10^{-4}$ m/s 时,渗透系数为第一种工况的 1/5,稳定入渗水流量为 $1.49 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,约为第一种工况的 1/5,入渗稳定所需时间约为 1 800 s,为第一种工况的 5 倍; $K=0.2 \times 10^{-4}$ m/s 时,渗透系数为第一种工况的 1/10,稳定入渗水流量为 $7.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$,约为第一种工况的 1/10,入渗稳定所需时间约为 3 600 s,为第一种工况的 10 倍; $K=0.1 \times 10^{-4}$ m/s 时,渗透系数为第一种工况的 1/20,稳定入渗水流量为 $3.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$,约为第一种工况的 1/20,入渗稳定所需时间约为 7 200 s,为第一种工况的 20 倍。从以上分析可见,稳定入渗水流量与渗透系数呈线性正比关系,入渗稳定所需时间与渗透系数呈线性反比关系。式(18)反映了这种规律。然而当渗透系数较小时,在渗流初期入渗流量较大,式(18)无法反映这种现象,这时使用式(18)计算会产生较大误差,计算结果将偏于低估实际入渗的水量。

5 结 论

基于海绵城市雨水入渗理念,提出了一种用于小区道路的雨水收集和入渗渗水井,在井内常水位条件下,建立了碎石透水井入渗砂层的瞬态渗流控制方程,给出了相应的理论解析解。利用解析解分析了渗水雨水井内积水入渗地层的过程,得到以下结论:

(1) 在透水井边缘,孔压最大,离开透水井,孔压逐渐降低。

(2) 稳定入渗水流量与渗透系数呈线性正比关系,入渗稳定所需时间与渗透系数呈线性反比关系。

(3) 该文解析解能计算雨水入渗地层过程中的孔压动态演化和入渗流量的动态演变过程,可用于该文海绵城市渗水雨水井入渗流量计算。

参考文献:

[1] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南[Z], 2014.

- [2] DREELIN E A, FOWLER L, RONALD CARROLL. A Test of Porous Pavement Effectiveness on Clay Soils During Natural Storm Events[J]. Water Research, 2006, 40: 799—805.
- [3] 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.
- [4] DEBUSK K M, WYNN T M. Storm—Water Bioretention for Runoff Quality and Quantity Mitigation[J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 137(9): 800—808.
- [5] Lin Chai, Masoud Kayhanian, Brandon Givens, et al. Hydraulic Performance of Fully Permeable Highway Shoulder for Storm Water Runoff Management[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 138(7): 711—722.
- [6] 吴礼舟, 张利民, 黄润秋. 成层非饱和土渗流的耦合解析解[J]. 岩土力学, 2011(8).
- [7] 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).
- [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] 顾天奇, 张古陶, 孙海洋, 等. 新建开发区海绵城市实践——以苏州太湖新城市政道路生态雨水渗透及利用工程为例[J]. 中国市政工程, 2016(2).
- [10] 车伍, 赵杨, 李俊奇, 等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水, 2015(8).
- [11] GB 50400—2006 建筑与小区雨水利用工程技术规范[S].
- [12] CJJ/T 190—2012 透水沥青路面技术规程[S].
- [13] CJJ/T 135—2009 透水水泥混凝土路面技术规程[S].
- [14] CJJ/T 188—2012 透水砖路面技术规程[S].
- [15] 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).
- [16] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- [17] 孔嵘, 王桂尧. 几种边坡生态防护形式对雨水入渗影响的试验研究[J]. 中外公路, 2014(1).
- [18] 黄卫东, 鲍世辉, 龚明辉. 基于缓解城市热岛效应的自冷式混凝土路面砖性能研究[J]. 中外公路, 2017(1).