

# 砂石渗井在黏土地区海绵城市建设中的应用

刘焯璇<sup>1</sup>, 李顺群<sup>1</sup>, 胡铁馨<sup>1</sup>, 夏锦红<sup>2</sup>, 王彦洋<sup>3</sup>, 李岩<sup>1</sup>

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 新乡学院 土木工程与建筑学院, 河南 新乡 453003; 3. 天津市建设工程技术研究所, 天津 300204)

**摘要:** 随着社会和经济的发展, 建筑物、硬化路面等不透水结构逐渐取代了大量原始天然地面, 从而造成了雨水入渗面积的迅速减少和由此引起的严重城市内涝。为解决我国水资源短缺和城市季节性洪水的双重危害, 提供了一种以砂石等渗透性强的粗骨料作为内置材料的黏土地层竖向增强体渗透装置。当出现强降雨时, 地表径流将汇流于密布的砂石渗井中, 然后沿井壁向四周的土层中渗流。由于井壁的面积远远大于井口的面积, 且一般情况下黏土的水平渗透性大于其竖向渗透性, 因而砂石渗井能大大增大雨水的下渗速度。进行了填充料和岩土介质的渗透测试以及在此基础上的单井和群井现场原位试验和相应的数值模拟。结果表明: 该装置经济、施工简单、效果明显, 是一种环境友好型低影响海绵城市建设方法, 为黏土地区海绵城市建设提供了一条有效途径。

**关键词:** 海绵城市; 低影响; 砂石渗井; 黏土地层; 原位试验; 数值模拟

中图分类号: TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0113-06

## Application of sand and stone seepage wells in sponge city construction of clay area

LIU Yexuan<sup>1</sup>, LI Shunqun<sup>1</sup>, HU Tiexin<sup>1</sup>, XIA Jinhong<sup>2</sup>, WANG Yanyang<sup>3</sup>, LI Yan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China; 3. Tianjin Construction Engineering Technology Research Institute, Tianjin 300204, China)

**Abstract:** With the development of society and economy, impervious structures such as buildings and hardened pavement gradually replace a large number of original natural ground, resulting in a rapid reduction of rain infiltration area and urban waterlogging. In order to solve the dual hazards of water shortage and seasonal urban flood in China, a vertical seepage device with sand and aggregate as internal material in clay layer was proposed. When heavy rainfall occurs, surface runoff will converge in densely packed sand seepage wells, and then seep along the wellbore into the surrounding soils. Because the area of shaft lining is much larger than that of wellhead, and the horizontal permeability of clay is generally greater than its vertical permeability, sand and stone seepage wells can greatly increase the infiltration rate of rain water. The permeability of sand and stone seepage wells with filling materials and geotechnical media was tested, based on which, the in-situ test and numerical simulation of single and group wells are established. The results showed that the device is economical, simple and effective, and it is an environment-friendly and low-impact sponge city construction method, which provides an effective way for the construction of sponge city in clay areas.

**Key words:** sponge city; low-impact; sand and stone seepage well; cohesive soil stratum; in-situ testing; numerical simulation

## 1 研究背景

城市是地区经济、文化、交通和政治的中心, 其

发展离不开水资源的有效供给<sup>[1]</sup>。随着社会的高速发展, 与水资源相关的各种问题日渐突出<sup>[2]</sup>。在各种问题中, 水资源严重短缺和城市内涝日益严重

收稿日期: 2018-09-17; 修回日期: 2019-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472253); 天津市自然科学基金重点项目(16JCZDJC39000); 天津市建设系统科学技术项目发展计划(No. 2016-25); 天津市建设工程技术研究所财政资金项目(JGY18-01)

作者简介: 刘焯璇(1991-), 女, 山东禹城人, 硕士研究生, 从事环境岩土工程方面的研究工作。

通讯作者: 李顺群(1971-), 男, 河南卫辉人, 博士后, 教授, 从事土力学和基础工程方面的教学和研究工作。

并存,越来越受到各级政府和人民群众的关注。

天津市水资源公报显示,2015年全市总供水量 $25.6750 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,比上年增加 $1.5881 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中引滦调水 $4.5130 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,引江调水 $3.9991 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。实际上,天津市当年平均降水量536.2 mm,折合降水总量为 $63.91 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。可见,本地区总降水量远远大于总供水量,理论上能满足各种需水要求,但事实是该年度像往年一样严重缺水而不得不花费巨资从别处调水。

与此同时,天津市的城市内涝越来越严重。据不完全统计,2016年7月19日、2017年7月15日、2018年8月6日,天津市均遭遇了严重的城市内涝,直接经济损失数十亿元。此外,我国北方的其他城市,比如北京、石家庄、郑州、沈阳等,同样面临着严重缺水与内涝并存的类似问题<sup>[4-6]</sup>。

城市缺水和内涝并存的原因是多方面的,主要包括用水量的日益增大、降水的季节不均匀性、市政设施建设滞后以及路面地面的过度硬化等<sup>[7-8]</sup>。

建设海绵城市是缓解水资源短缺和城市雨洪灾害,推进可持续发展的有效途径<sup>[9-10]</sup>。既有方法主要是利用植草沟<sup>[11]</sup>、渗水砖<sup>[12]</sup>、雨水花园<sup>[13]</sup>、下沉式绿地<sup>[14]</sup>等措施组织排水和蓄水。然而,这些方法的特点是造价高、工期长、覆盖面小、运行成本高、旧城区难应用、对生态的影响大、难以推广等。

本文基于低影响开发理念<sup>[15-16]</sup>和多孔介质理论<sup>[17]</sup>,提出了一种构造简单、施工方便、适应性强、经济适用的加速入渗装置。该装置能充分利用土层较大的横向渗透系数,将强降雨引起的地表径流快速诱导至竖向渗透性差的土层中并储存起来,从而起到减轻城市内涝和涵养地下水的双重作用。

## 2 砂石渗井的结构形式和相关参数

所谓加速入渗装置是一种埋设于土体中的竖向渗透增强装置,是一种由砂石作为内置填充材料的渗井装置,本文称之为砂石渗井。

### 2.1 黏土在不同方向上的渗透系数研究

黏土的形成过程是一个一维压缩过程,即在三个主方向上的压力并不相等,从而形成土微观结构的各向异性。一般情况下,黏性土的渗透系数与渗流方向是相关的,即不同方向上的渗透系数是不同的。为此,进行渗流方向与渗透系数的试验研究是必要的。

用环刀在原始场地取土,取样的方向由环刀轴线方向与水平方向的夹角控制,如图1所示。

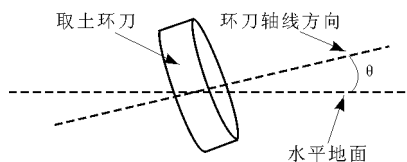


图1 渗透性试验的取样方向

取土的角度 $\theta$ 分别设置为 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ 。每个角度取3个试样分别进行变水头渗透试验,并取3个渗透系数的平均值作为该方向的渗透系数。由上述试验得到的不同方向上的渗透系数如表1所示。

表1 黏土在不同方向上的渗透系数

$\theta / (^\circ)$	0	15	30	45	60	75	90
渗透系数 $10^{-4} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	12.95	8.02	7.30	5.75	4.76	4.51	3.80

由表1可知,当取土角度 $\theta$ 为 $0^\circ$ 时,土样的渗透系数最大;当取土角度 $\theta$ 为 $90^\circ$ 时,土样的渗透系数最小。即该土层在水平方向上的渗透系数最大,在竖直方向上的渗透系数最小,前者是后者的3.4倍。可见,该土层在不同方向上的渗透系数差别很大,充分利用这一性质能大幅度提高该土层的下渗能力。基于上述不同方向上渗透系数的差别,在该黏性土层中钻取一定尺寸的渗井孔,并在井孔内填置高透水性填料,即可形成能大幅度改善土体渗透性能的小型渗水装置。

### 2.2 砂石渗井的结构

砂石渗井的施工过程如下:(1)通过人工或机械方法在地面上成孔,孔的直径、深度和间距根据降雨参数、土层的渗透性由计算确定;(2)选取渗透系数足够大的砂石材料,去除杂质和过大的颗粒;(3)将符合要求的砂石材料填筑在各渗井孔内,并进行必要的密实。当强降雨来临时,地表径流就可以沿着砂石渗井由地表迅速流入井内,并沿着井壁向四周土层中快速入渗,从而大幅度提高土层的表观渗水能力。

### 2.3 井孔内的填充材料

在选择渗井填充材料时,应着重考虑其渗透性能,以选择渗透系数大的砾、粗砂等粗颗粒材料为宜,本文采用天然河砂作为填充材料。为研究填充材料的水力学参数对渗井功能的影响,先后进行了所用河砂的颗分试验和渗透性试验。

采用筛分法对河砂的颗粒级配进行分析。样品

经烘干、碾碎后称取 500 g 进行筛分。标准筛的孔径由上而下分别为 5、2、1、0.5、0.25、0.125 和 0.075

mm。通过筛分试验,得到了试验用砂样各号筛的筛余质量,如表 2 所示。

表 2 试验用砂样各号筛的筛余质量

粒径/mm	>5	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.125~0.25	0.075~0.125	<0.075
质量/g	85.41	189.77	66.12	91.14	38.78	12.25	10.83	5.84

在此基础上,得到了表 3 所示该天然河砂的颗粒组成参数指标。

表 3 试验用天然河砂的颗粒组成参数

参数	$d_{10}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$	$d_{60}/\text{mm}$	$C_u$	$C_c$
取值	0.3416	0.9815	2.8040	8.2084	1.0057

由表 3 可知,  $C_u = 8.2 > 5$ ,  $C_c = 1.0$  (介于 1 ~ 3 之间)。可见,所选填充材料为良好级配砂。

为充分认识填充材料的渗透性能,进行了不同粒组的常水头试验。根据表 2 的筛分成果,将砂样分成不同的粒组,然后制备成与原始河砂密度相同的试样,并测试其渗透系数,结果如表 4 所示。

表 4 密度相同时不同粒组的渗透系数

粒径/mm	原样	>5	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5
渗透系数 $/10^{-2}(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	4.58	192.23	31.26	10.28	3.56	0.46

可见,粗颗粒单一粒组(粒径大于 1 mm)的渗透系数远远大于原状砂的渗透系数;而细颗粒单一粒组(粒径小于 1 mm)的渗透系数小于原状砂的渗透系数。即粒径越大,渗透系数也越大。

在方案对比后,确定了砂石渗井的设计方案:(1)在黏性土层上开挖圆柱形渗井孔,其直径和深度分别为 20 和 100 cm;(2)井孔内填充去除了 1mm 以下粒组的河砂并分层密实,这样就完成了一个适用于黏土地层的渗水装置。该装置能充分利用土层的水平渗流能力,将尽可能多的地表径流快速渗入土层并储存起来。可以达到减少暴雨灾害和补充地下水的双重作用,且符合低影响开发理念。

### 3 砂石渗井的原位试验

为便于对比,以下所有渗井的内置材料和几何尺寸都一样。

#### 3.1 作用机理和试验方案

土体中含有大量不同尺寸的孔隙,这些孔隙既是存水的空间又是过水的通道<sup>[18]</sup>。作为一种竖向

渗水构件,砂石渗井不仅提高了竖向渗透能力,而且也提升了土体在水平方向渗透性能的使用效率。雨水引起地表径流经砂石渗井时,径流将沿其内部填充料发生自上而下的竖向渗流,随后填料中的雨水流出渗井壁并向周围土体中发生横向渗流<sup>[19-20]</sup>。通过研究不同土层含水率的变化,即可揭示砂石渗井对改善土体渗透能力的作用机理。故在原始场地上进行了砂石渗井渗透性试验,试验包括单井井口注水试验、单井区域渗水试验和群井区域渗水试验 3 个类型。

#### 3.2 单井井口注水试验

单井井口注水试验为只对井口进行注水的试验,其目的在于研究单井的渗水效果。

在井口注水 3 次,每次注水的时间间隔为 2 h,注水量分别为 22、14、11 kg。在每次注水 1 h 后,用洛阳铲在预定位置取土样并测试其含水率。3 次取样的平面位置各不相同,即 3 次取样在平面上的角度间隔为 120°,如图 2 所示。其中,黑色球体为取土点, $L$  为水平间距等于 25 cm, $H$  为竖向间距等于 20 cm。

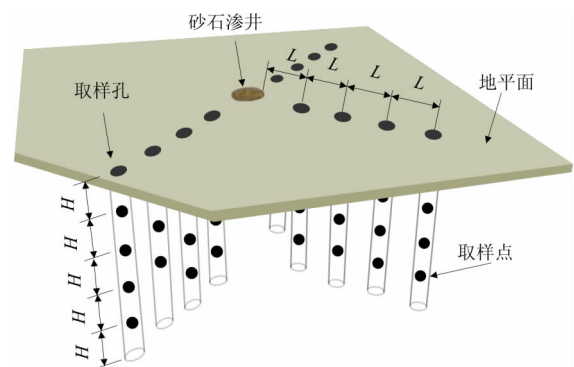


图 2 单口渗井自渗水试验现场布置示意图

限于篇幅限制,本文给出了第 3 次取土得到的含水率,其结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出:(1)当到渗井轴线的水平间距相同时,土样的含水率随深度的增加而增大;(2)当距离地表的深度相同时,土层的含水率随着到渗井中心水平间距的增大而明显减小;(3)从取样的

含水率变化幅度看,靠近渗井土样的含水率变化最为显著。

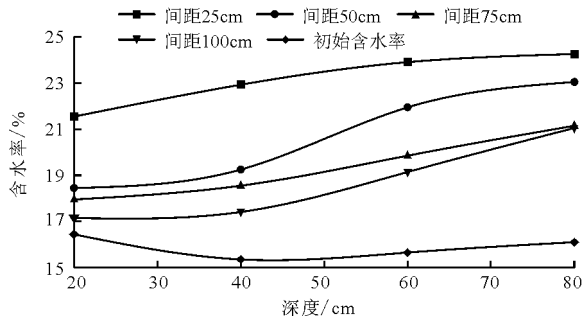


图3 单井口水注试验第3次注水后各测试点土体含水率

由此可见,砂石单渗井能显著提高地表水的下渗能力。下渗的水可用于补充渗井周围的地下水资源,提高周围土体的含水率且距离渗井轴线越近含水率提高的幅度越大。

### 3.3 单井区域渗水试验

单井区域渗水试验指同时对渗井口和周围土体进行注水以测试渗井渗水效果的试验。本次测试设置的注水面积为 2.5 m × 2.5 m,如图4所示。



图4 单井区域注水试验

注水分3次进行,每次注水量均为 180 kg,3次注水后的渗毕时间分别为 30 min、85 min、150 min。待入渗完毕后,用洛阳铲取土,取土点位置如图2所示。取土后进行含水率测试,其中第3次注水后各测点的含水率如图5所示。

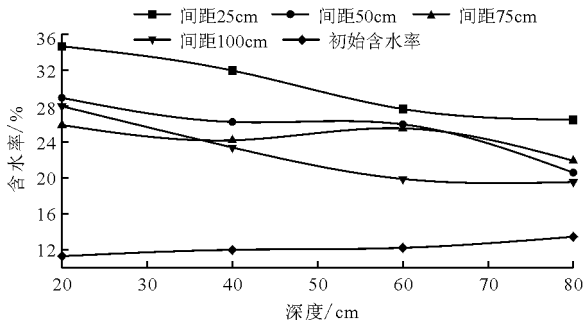


图5 单井区域注水试验第3次注水后各测试点土体含水率

由图5可知:(1)距离渗井轴线相同的各点,其

含水率随深度的增加而减小;(2)在相同深度处,土体的含水率随着水平间距的增大而减小。由此可见,渗井对地表水入渗能力的提高非常明显。

### 3.4 群井区域渗水试验

群井区域渗水试验是指3口相同的砂石渗井分别处于边长为 100 cm 的等边三角形的3个顶点,而等边三角形的中心位于矩形区域中心,如图6所示。注水同样分3次进行,每次注水量与单井区域渗水试验相同即 180 kg,3次注水后的渗毕时间分别为 27、60、100 min。



图6 群井渗水试验和含水率测试

含水率测试的取样点位如图7中的竖向圆点所示。取样点的横向间距为 0.25 m,纵向间距为 0.2 m。

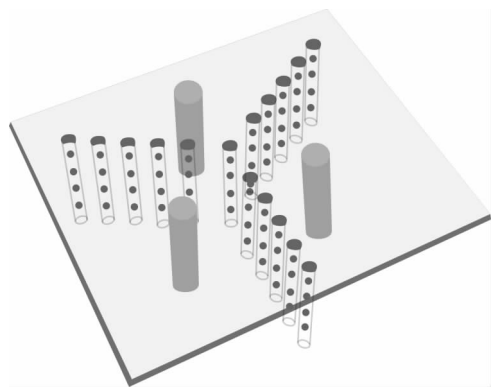


图7 砂石渗井和取土点的位置

通过烘干法可以测得不同位置点的含水率,其中第3次注水后的含水率如图8所示。

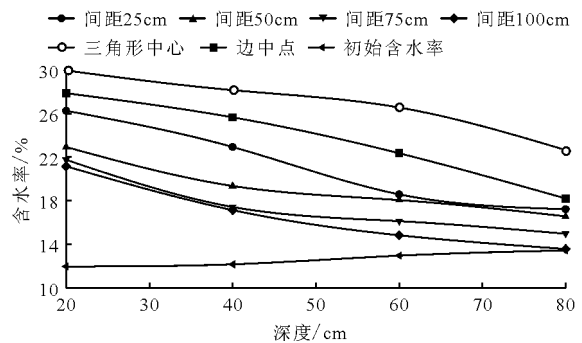


图8 群井区域注水试验第3次注水后各测试点土体含水率



比较 3.3 和 3.4 两个试验的渗毕时间可知,每次注水后,群井的渗毕时间均小于单井的渗毕时间。随着累计注水量的增大,群井的入渗速度越来越快,但并非等比例加快。所以注水量越多,群井入渗效率越高,入渗效果也越明显。

综上所述,当水平间距相同时,渗井入渗效果随深度的增加而增大。当深度相同时,渗井入渗效果随到渗井中心水平间距的增大而减小。渗井周边土层的增湿最为显著,且群井效果好于单井效果。

### 4 数值模拟

为进一步研究砂石渗井的入渗功能,本节基于黏土饱和与非饱和特性及其渗透各向异性,对上述群井的入渗效果进行了模拟。

#### 4.1 饱和与非饱和渗流

在饱和土中,引起水分迁移的主要动力是水的重力和压力;而在非饱和土中,引起水分迁移的作用还包括表面张力引起的基质吸力。降雨入渗对地下水补给的过程既包括饱和渗流又包括非饱和渗流,均属于典型的非稳态流<sup>[21-23]</sup>。

#### 4.2 建模过程

计算模型的尺寸设置为 8 m × 8 m × 5 m。砂石渗井按图 9 和 10 所示的等边三角形进行布置,其尺寸与前文所述一致。为进行对比,数据采集点布置在两个相互垂直的平面上,其中一个为三角形底边的垂直平分面,即剖面 1-1;另一个为通过三角形重心且垂直于剖面 1-1 的平面,即剖面 2-2。

在 Property 功能模块中,根据前文测试结果,设置渗井的渗透系数,以及土层的水平和竖向渗透系数。同时,设置土体的密度等参数。

利用 Distribution 空间分布函数,在计算模型的前、后、左、右 4 个面的地下水位以下边界处,设置随深度线性增加的孔隙压力以满足水头边界条件。除孔压边界条件以外,还应对模型两侧地下水位以上的边界,应用 inp 文件定义自由排水边界,其他边界则设置为不排水边界。边界条件设置后,设置初始条件。在预定义场中对模型的初始饱和度、初始孔隙比以及初始孔隙压力进行定义。

等边三角形砂石群井的模型采用扫掠网格划分(swept meshing)技术,模型采用 CPE4P 孔压单元,并对渗井及周围网格划分进行细化,网格划分结果如图 11 所示。

#### 4.3 对比分析

注水 1 h 后,剖面 1-1 上的流量矢量如图 12

所示。由图 12 可知,渗流速度随深度的增加而增大。在渗井底端,渗流速度达到最大,渗流的主方向向下。

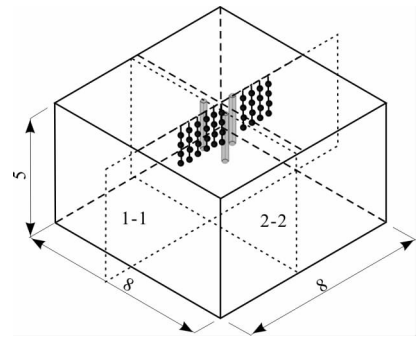


图 9 采用的计算模型(单位:m)

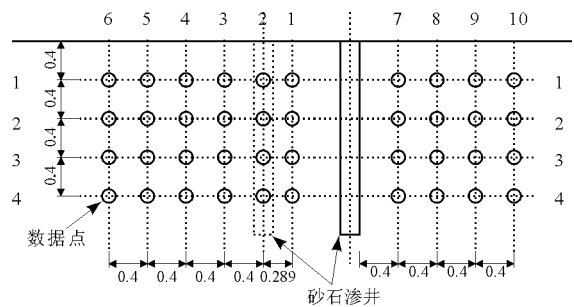


图 10 数据点的布置(单位:m)

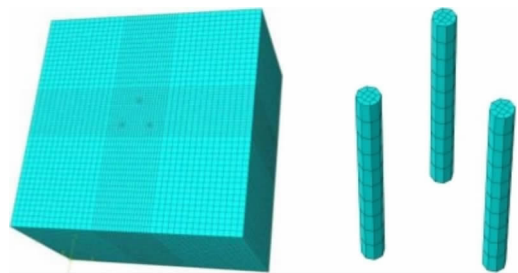


图 11 数值模型的网格划分

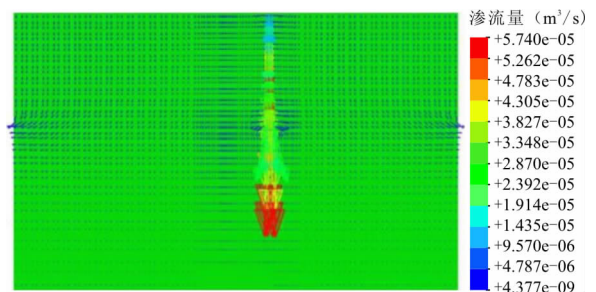


图 12 注水 1 h 后剖面 1-1 的渗流矢量图

其原因在于,该部位的水力梯度最大且下部大范围的非饱和土体能消纳大量的入渗水。在远离井端的区域,渗流的主方向趋向于水平,反映出土的水平渗透系数较竖直渗透系数大的作用效果。

图 13 为注水停止 24 h 后,剖面 2-2 的饱和度

云图。由于土体水平渗透系数大于竖向渗透系数,注水停止后附近土层中的水分会向渗井处移动并汇聚,故在渗井周围一定区域内出现了明显的饱和度降低区。同时,土层的浸润面在渗井下部出现了明显的突起,说明渗井加速入渗的效果非常明显。

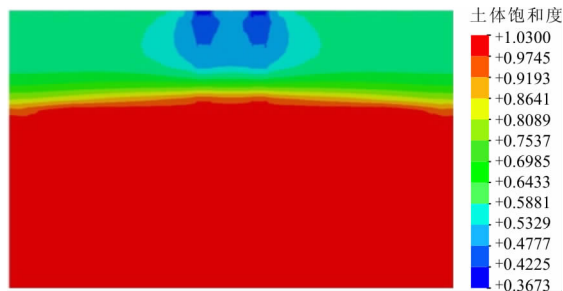


图 13 注水停止 24 h 后剖面 2-2 的土体饱和度云图

## 5 结 论

基于低影响理念和多孔介质渗透原理,设计了一种高渗透砂石渗井装置,在此基础上进行了单井和群井的原位试验合数值模拟。

(1)河砂是砂石渗井的内置填充材料,因此该装置具有较高的渗透性。地表径流汇集于渗井口流入渗井时,由于渗井不但可加速水体在垂直方向的渗流速度,还能促进井中水发生垂直于井壁的渗流,故能大幅度增强雨水的入渗速度,从而消减地表径流、提高土体含水率。

(2)对比研究了渗井的原位测试结果,发现当水平间距相同时,渗透效果随渗井深度的增加而增大。当垂直深度相同时,渗井渗透效果随水平间距的增加而减小。等边三角形组成的群井,其渗透过程与单井区域渗水模式类似,但其作用效果更好、渗流速度更快。

(3)现场测试和数值模拟表明,砂石渗井装置对地表径流的加速入渗效果显著,有助于土体在雨季涵养更多的水资源,从而为黏土地区的海绵城市建设提供了一种新的思路和方法。

### 参考文献:

- [1] 鲍超,贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示[J]. 地理科学进展,2017,36(1):58-67.
- [2] 周斌. 水资源开发与利用科研工作的现实制约与对策建议[J]. 中国环境管理,2018,10(2):99-100.
- [3] 田川. 天津水资源短缺的原因及建议[J]. 现代农业科技,2016(10):159-160.
- [4] 刘嘉男,李发文,冯平,等. 设施农业对农田排涝模数影

- 响[J]. 中国农业资源与区划,2018,39(4):90-102.
- [5] 郝光玲,王烜,罗阳,等. 基于改进的综合评价模型的北京市水资源短缺风险评价[J]. 水资源保护,2017,33(6):27-31.
- [6] 张安凝,解文娟. 河北省4次重大暴雨洪涝天气特征及影响分析[J]. 科技资讯,2017,15(23):96-98.
- [7] 孙芳. 基于海绵城市的城市道路系统化设计研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.
- [8] 杨青娟,朱钢. 雨水管网和城市绿地的协同优化设计研究[J]. 中国给水排水,2014,30(7):94-98.
- [9] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划,2015,39(6):26-36.
- [10] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学,2016(1):79-97.
- [11] 王龙涛,赵建伟,华玉妹,等. 植草沟净化地表径流运行条件优化[J]. 环境工程学报,2016,10(9):4855-4860.
- [12] 张静波,蔺建学. 透水砖在海绵城市建设中的应用[J]. 砖瓦世界,2016(9):27-28.
- [13] 唐双成,罗纨,贾忠华,等. 雨水花园对暴雨径流的削减效果[J]. 水科学进展,2015,26(6):787-794.
- [14] 危薇. 基于“海绵城市”理念的下沉式绿地优化设计探讨[J]. 城市建筑,2016(29):48-48.
- [15] DAMODARAM C, GIACOMONI M H, KHEDUN C P, et al. Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable storm water management[J]. Journal of the American Water Resources Association,2010,46(5):907-918.
- [16] DIETZ M E. Low impact development practices:a review of current research and recommendations for future directions[J]. Water Air & Soil Pollution,2015,22(4):543-563.
- [17] CHEN Weiyun, XIA Tangdai, HU Wentao. A mixture theory analysis for the surface-wave propagation in an unsaturated porous medium[J]. International Journal of Solids and Structures,2011,48(16-17):2402-2412.
- [18] 薛禹群,朱学愚,吴吉春. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社,1997.
- [19] 华静,杨华舒. 土石坝渗流计算中的有限元应用研究[J]. 中国水能及电气化,2012(7):15-18.
- [20] 师文豪,杨天鸿,于庆磊,等. 层状边坡各向异性岩体渗流-应力耦合模型及工程应用[J]. 岩土力学,2015,36(8):2352-2360.
- [21] 杨昱. 饱和非饱和渗流基本微分方程的推导[J]. 河南水利与南水北调,2015(14):76-79.
- [22] WAECHTER R T, PHILIP J R. Steady Two and Three-dimensional flows in unsaturated soil:the scattering analog[J]. Water Resources Research,1985,21(12):1875-1887.
- [23] 朱伟,程南军,陈学东,等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):235-240.