

DOI:10.19479/j.2095-719x.2501008

考虑非饱和与各向异性影响的土体加速入渗渗井 优化布置

刘立洋¹,李顺群¹,肖明睿²,王志昊¹

(1. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室,天津 300384;

2. 大连理工大学 工程力学系,大连 100024)

摘要:土体加速入渗技术是拓展海绵城市建设方法的重要技术,利用高孔隙、大渗透系数和土体各向异性等特点的中粗砂渗井能够显著提升雨水的入渗速率.为分析土体入渗过程并找寻非饱和土场地砂石渗井的最优布置设计规律,考虑土体的非饱和特性及土中不同方向渗透系数的各向异性,对土体的加速入渗过程进行了模型研究.研究表明:土体的雨水入渗过程是瞬态过程,获取的水分场与时间相关;考虑土体存在的各向异性特性,获取的水分场更能体现出竖向渗透通道对雨水加速入渗的影响;渗井与土层的接触面是影响渗井加速入渗效果的最重要因素,渗井建设过程中优先采用直径较小的渗井;从使用效果上来看,渗井的设置深度不宜超过地下水位.

关键词:海绵城市;非饱和土;渗井;优化布置;导水系数

中图分类号:TU43

文献标志码:A

文章编号:2095-719X(2025)01-0008-07

Optimal Layout of Infiltration Wells Considering Unsaturated and Anisotropic Influences on Accelerated Infiltration in Soils

LIU Liyang¹, LI Shunqun¹, XIAO Mingrui², WANG Zhihao¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, TCU, Tianjin 300384, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 100024, China)

Abstract: Accelerated soil infiltration technology is an important technology to expand the construction method of Sponge City. The medium-coarse sand in filtration well with the characteristics of high porosity, large permeability coefficient, and soil anisotropy can greatly improve the infiltration rate of rainwater. In order to analyze the infiltration process of soil and find the optimized layout of sand and gravel infiltration wells in unsaturated soil sites, considering the unsaturated characteristics of soil and the anisotropy of permeability coefficient in different directions in soil, the authors conducted a model study of the accelerated infiltration process of soil. The results show that the rainwater infiltration process of soil is a transient process, and the obtained moisture field is time-dependent. In view of the anisotropic characteristics of the soil, the obtained water field can better reflect the influence of vertical infiltration channels on the accelerated infiltration of rainwater. The contact surface between the infiltration well and the soil layer is the most important factor affecting the accelerated infiltration effect of the percolation well, and the percolation well with smaller diameter is preferred in the construction process of the infiltration well. From the application effect, the depth of the percolation well should not exceed the groundwater level.

Key words: Sponge City; unsaturated soil; infiltration well; optimized layout; hydraulic conductivity

随着城市化进程的加快,城市地表不透水面积的增加和地下水超采的影响,城市水生态环境急剧恶化^[1].加之,我国降水资源的时空分布不均,季节性洪涝灾害和水资源短缺共存的矛盾,已成为影响我国城市健

康发展的重要因素^[2-3].为降低地表径流,提升降水利用率,我国自2014年开始进行“海绵城市”建设^[4-5].然而,我国海绵城市建设面临着方式技术单一和需求不匹配的矛盾,比如现有的透水地面、人工湿地、生态滞

收稿日期:2023-03-08;修订日期:2023-03-29

基金项目:国家自然科学基金(41877251);天津市重点研发计划(19YFZCSF00820)

作者简介:刘立洋(1995—),男,天津人,天津城建大学硕士生

通讯作者:李顺群(1971—),男,教授,从事岩土工程研究. E-mail: lishunqun@sina.com.

留等方式,仅能利用地表 10~20 cm 的土层作为储水载体,无法充分利用深处土层作为“天然海绵”,也无法缓解日益严重的城市内涝和地下水位持续下降等生态问题^[6-8]。海绵城市建设核心目标是使 70% 的降雨就地消纳和利用;到 2030 年,80% 的城市建成区需达到该要求^[9]。因此,探索适合我国海绵城市建设的有效方案,对于满足海绵城市建设需求具有重要的工程价值。

土体是典型的多孔含水介质,将土体作为“海绵”进行储水具有较高可行性和研究基础^[10]。在土体的入渗研究方面,徐洪等^[11]对地基土的渗透各向异性问题进行了研究,发现渗透系数是与水平方向夹角的函数。冯彦芳等^[6]分析了砂石渗井增大土体入渗量的原因,并对饱和场地的入渗过程进行了数值分析。侯英剑等^[12]对布置渗水构件和未布置渗水构件的土体渗水效果进行量化分析,研究了降水条件下土体及渗井孔隙水压力的动态变化规律。车生泉等^[13]对国外发达国家的雨洪管理和技术应用进行了论述,提出了适于我国海绵城市建设的发展策略。刘焯璇等^[7]基于低影响开发理念和多孔介质理论,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。邵龙潭等^[14-15]给出了一种非饱和土渗透系数的测量方法和预测公式,并对土体入渗过程中气体溢出过程进行了理论研究。

既有的研究指出^[6],在土中设置竖向的砂石渗井能够利用土体的渗透各向异性特性,降低一端封闭微孔隙的影响,增加雨水与土之间的接触面积;造成入渗锋面存在不均匀水势,加速土中气体溢出^[15],从而提升雨水的入渗速率。需要注意的是,城市浅层土多处于非饱和状态,且降雨时限往往较短,土体整体处于非饱和和入渗向饱和土入渗的过渡阶段。在非饱和土入渗过程中,存在着土中不同方向渗透系数的差异性,也存在降雨入渗压力作用下土中气体的溢出。因此,考虑雨水非饱和和入渗过程以及土体各向异性的影响,研究入渗效能以及渗井最优布置,对于指导海绵城市设计和施工具有实际价值。基于此,本文通过总结饱和与非饱和土地场的渗透系数,采用数值分析手段,对不同因素影响下的雨水入渗过程进行了研究,分析了场地砂石渗井的最优布置形式。

1 含渗井场地的雨水入渗过程分析

以江汉平原地区某场地为例,确定了饱和土的渗

透系数为 4.94×10^{-5} cm/s, 两向渗透系数 k_y/k_x 之比为 0.25, 饱和体积含水量取 0.40。初始孔隙水压力为 -200 kPa。该地区年最大降水强度为 79.5 mm/h。取粒径在 1~2 mm 之间的均匀砂作为渗井填料,其渗透系数为 1.028×10^{-3} m/s 的。采用的场地模型为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的长方形,渗井尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 基于 Grostudio 软件进行建模分析,模型如图 1 所示。

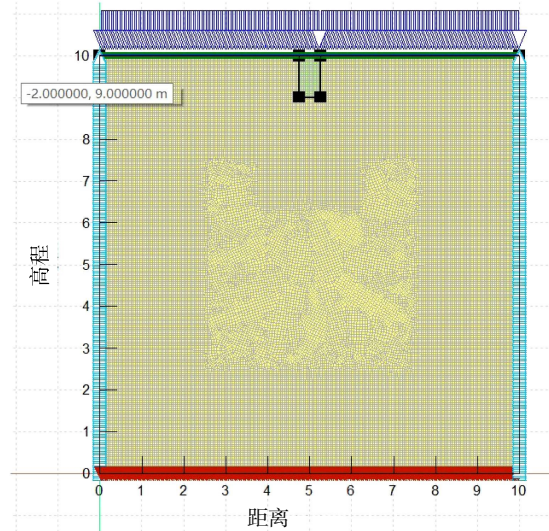


图 1 计算模型

1.1 非饱和土的各向异性入渗过程

采用图 1 的计算模型和模拟参数,对考虑各向异性影响的入渗过程进行模拟。获取的 1 h、12 h 的饱和度和孔隙水压力等值线图如图 2 所示。

由图 2 中可看出,雨水刚开始入渗时,会在土体表面形成一层暂时的饱和层;而相同时刻,渗井内雨水则已经向下渗入砂体内部,导致表层土体的孔隙水压力在短时间内大于渗井浅层的孔隙水压力。在表层对渗井与土体交界处产生一定的作用,但随着时间的推移,表层饱和区土体中水分逐渐下渗。湿润锋面开始逐渐向下移动,此时,在相同深度位置,能够清晰地看到,渗井中的孔隙水压力要明显大于远离渗井区域的孔隙水压力。观察饱和度云图也可以清晰发现,除入渗初期由于雨水在表层积累而形成的短暂饱和外;随着时间推进,入渗的推进,相同时间,相同深度,土体内越靠近渗井的位置饱和度越高。

为了直观体现土体内的饱和度和孔隙水压力变化,给出了渗井轴心和距渗井轴心 0.45 m 处不同深度的孔隙水压力值。同时,为了体现砂石渗井在雨水入渗过程中的作用,对未布置砂石渗井场地进行了模拟,其中降水强度、土体参数等均与含渗井场地相同,结果如图 3 所示。

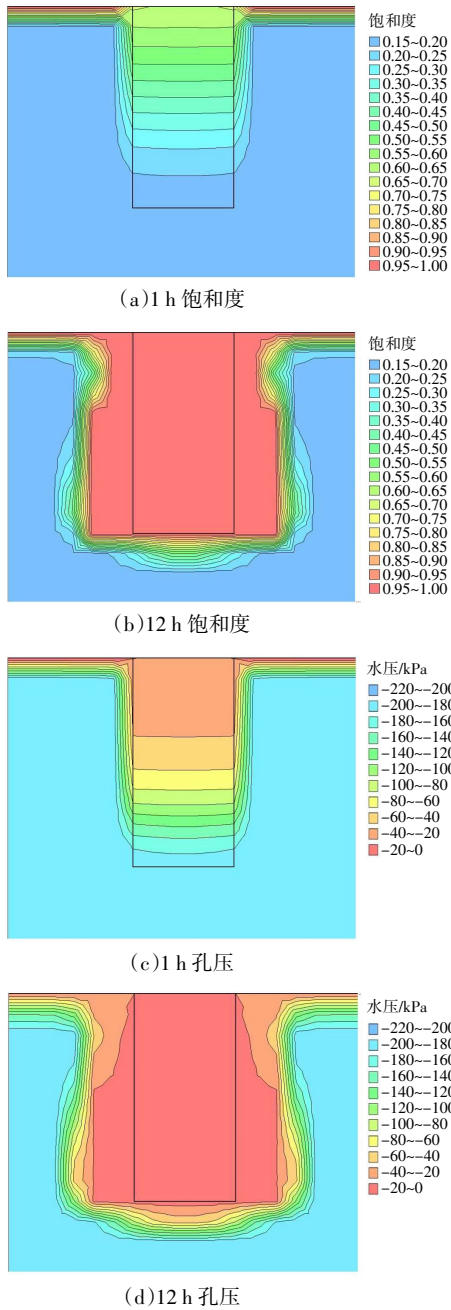


图 2 饱和度和孔隙水压力等值线图

由图 3 可看出, 相同时间和相同深度情况下, 未布置砂石渗井的土体孔隙水压力要小于布置砂石渗井组的孔隙水压力. 由此可见, 随着渗透系数的增加, 单位时间内通过的水量显著增加, 设置砂石渗井有助于帮助雨水更快地渗入更深的土体, 使得渗井-土体整体的渗透效果有所提高.

降雨工况下, 随着时间的增加, 含渗井场地的孔隙水压力也随之增加. 对比不同位置孔压分布可以看出, 相同深度, 入渗初期渗井中的孔隙水压力要远大于渗井外土体的孔隙水压力. 而深度低于 1 m 即渗井

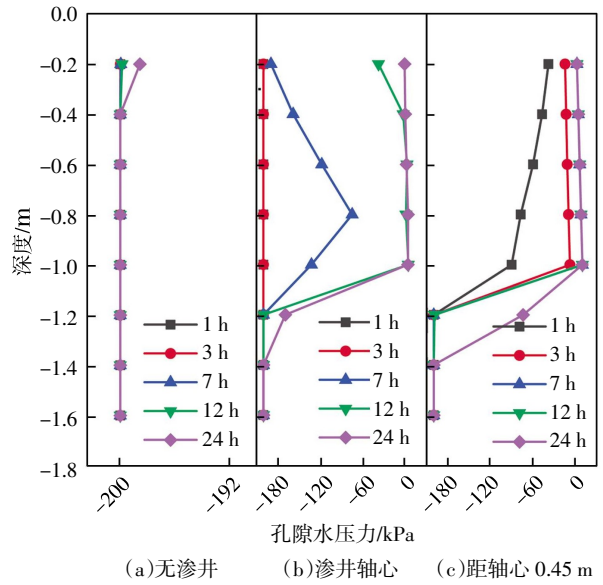


图 3 孔隙水压力沿空间的分布

外区域, 在渗透初期, 渗井中轴线上相同深度测点与距渗井 0.45 m 的测点孔隙水压力基本一致; 随着时间推进, 入渗进程逐渐推进, 观察深度 0~1 m 之间的测点, 渗井内外的孔隙水压力逐渐接近; 这是由于渗井中水开始向横向土体中入渗, 导致渗井附近土体孔隙水压力逐渐接近渗井内. 深度大于 1 m 的区域, 相同深度, 位于渗井中轴线上的测点的孔隙水压力依旧明显大于距其 0.45 m 的测点, 且随时间变化, 孔隙水压力的差距也随之增大. 表明砂石渗井加速了其附近雨水在土体内的渗透.

为了继续探究砂石渗井对周围土体入渗的促进规律, 选取距渗井中心不同位置处的测点(见表 1), 将其饱和度演变列于图 4 中.

由图 4 可知, 距渗井中心距离相同时, 离地表近的测点 A、测点 D 和测点 G 较晚达到饱和状态; 距地表深的测点 C、测点 F、测点 I 较早达到饱和状态. 离渗井中心距离最近的测点 A、测点 B、测点 C 渗流速度最快, 在 16 h 之后已达到完全饱和状态; 距离最远处的测点 G、测点 H、测点 I 饱和度变化梯度缓慢, 渗流速度最慢, 24 h 之后仍未达到完全饱和状态. 这是因为, 土体的渗透是一个瞬态过程, 重力作用下水逐渐向深部土体渗透, 直至被不透水层或者封闭的孔隙

表 1 距渗井中心不同位置处的测点编号

深度/m	编号		
	距渗井 0.45 m	距渗井 0.55 m	距渗井 0.65 m
0.2	A	D	G
0.4	B	E	H
0.7	C	F	I

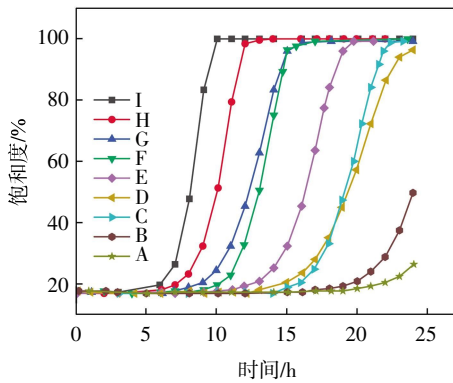


图 4 距渗井中心不同位置处的饱和度

气阻止;之后,下部的雨水逐渐汇集并使得土体趋于饱和. 当在不同的阶段观测土体的入渗规律时,其表现为不同的规律.

继续分析图 4 可知,相同深度时,距离渗井中心越近,土体越早达到饱和,渗井对雨水入渗的促进作用越明显. 在距离渗井中心相同距离时,饱和度随着深度的增加而增加,且越深的测点达到饱和状态所需时间越少. 这是因为砂石渗井的渗透系数较大,雨水迅速渗入渗井当中,大量雨水通过渗井侧壁向四周土体扩散,增大了水分的入渗面积;由于粗砂渗透系数较大,故而扩散速度较快,致使周围土体的含水量与原始场地相比呈现大幅增长情况;且越靠近渗井部位的土体,受其作用越明显. 而由于土体渗透的各向异性,在距离渗井距离相同时,水平渗透系数高于竖直渗透系数,以至于水平方向上饱和度增长较之于竖直方向更加迅速.

1.2 非饱和土的各向同性入渗过程

为分析土体各向异性对渗流过程的影响,对各向同性状态下的渗流过程进行模拟. 获得的 1 h 和 12 h 的孔隙水压力分布如图 5 所示.

对比图 2 和图 5 可看出,不考虑各向异性时雨水从土体表层下渗的速度和从渗井下壁向下方土体内下渗的速度都明显加快,而在水平方向上,从渗井壁向水平方向入渗的速度则没有明显变化. 由于考虑了各向异性,竖直渗透系数的增加加快了雨水竖直方向入渗的速度. 对比是否考虑各向异性获取的孔压分布发现,即使不考虑各向异性,雨水在远离渗井位置的渗透速度也要远低于布置渗井后渗井附近的渗透速度,仍然能够体现出渗井在提升雨水入渗速率上的积极作用.

1.3 考虑地下水位影响的非饱和土入渗过程

以图 1 的模型为基础,考虑渗透系数的各向异性,并设置地下水位深度为 2 m. 模拟获取的不同时刻的饱和度云图和孔隙水压力,如图 6 所示.

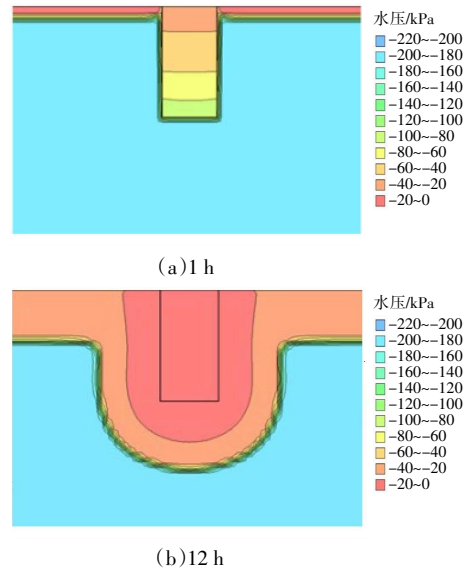


图 5 孔隙水压力等值线图

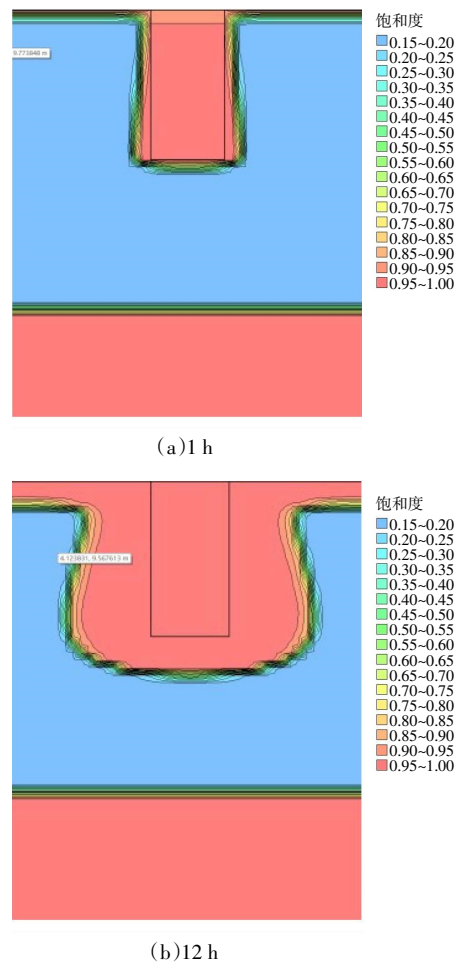


图 6 饱和度等值线图

对比图 7 中是否考虑各向异性的两组数据,可以发现,土体各向异性在渗透初期对孔隙水压力几乎没有影响. 随着时间推移,由于不考虑各向异性时,土体表面雨水下渗相对较快,土体浅层渗井外壁处由土壤

下渗的水与渗井内外渗的水产生相互作用,对渗井内孔隙水压力产生一定影响,孔压有少许增大.而深处由于土体渗水仍未达到,故几乎没有影响.而在距渗井 0.45 m 处,雨水入渗明显加快,原本主要依靠渗井外壁入渗的土体,现在也可以更早地获得上方土体下渗的水分,孔隙水压力明显增大,雨水的下渗明显加快.

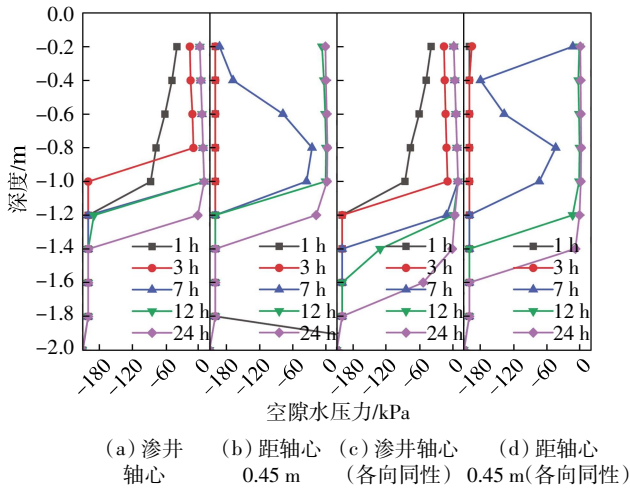


图 7 孔隙水压力沿空间的分布

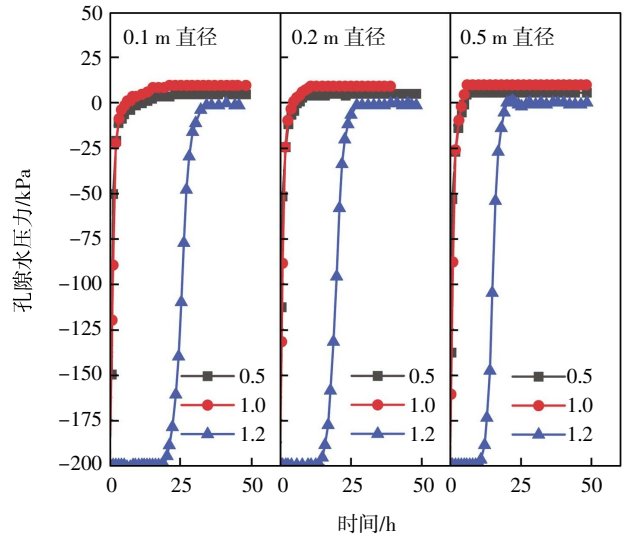
2 渗井的最优布置形式分析

上述研究表明,场地中设置渗井能够显著提升场地的入渗效能.进一步,研究渗井直径、长度和井间距对渗流效果的影响.

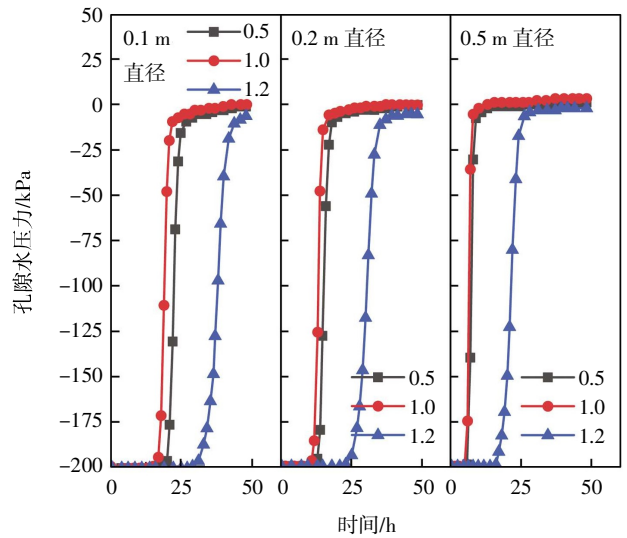
2.1 渗井直径影响下的入渗过程分析

以图 1 模型为基础,考虑土体渗透系数的各向异性,并设置地下水位深度为 2 m,分别模拟直径为 0.1, 0.2, 0.5 m 渗井的入渗过程,将入渗过程中渗井轴心和距轴线 0.45 m 处的孔隙水压力列于图 8.

由图 8 对比可看出,渗井直径不会改变渗井中心位置孔隙水压力,但随着渗井直径的降低,距渗井外距 0.45 m 处孔隙水压力突变的时间和稳定在 0 kPa 的时间都随着渗井直径的缩小而延后,可见渗井直径越大,渗井壁离固定点越近,从井壁到土体的距离越近,越容易达到饱和. 0.1, 0.2, 0.5 m 直径的渗井外部孔压突变点分别发生在 17, 11, 6 h 时段, 单位长度 0.1, 0.2, 0.5 m 直径的渗井用材之比为: 1 : 4 : 25, 其接触面积之比为: 1 : 2 : 5. 可见, 随着渗井直径的增加, 其影响范围并不与用材量成比例增加, 入渗效率与渗井和土层的接触面积近似相关, 渗井直径越小越利于入渗效率的提升. 但实际工程中, 除了要考虑入渗过程中的速度问题, 也必须要考虑施工可行性. 渗井直



(a) 渗井轴心不同高度点孔隙水压力分布



(b) 距渗井轴心 0.45 m 处不同高度点孔隙水压力分布

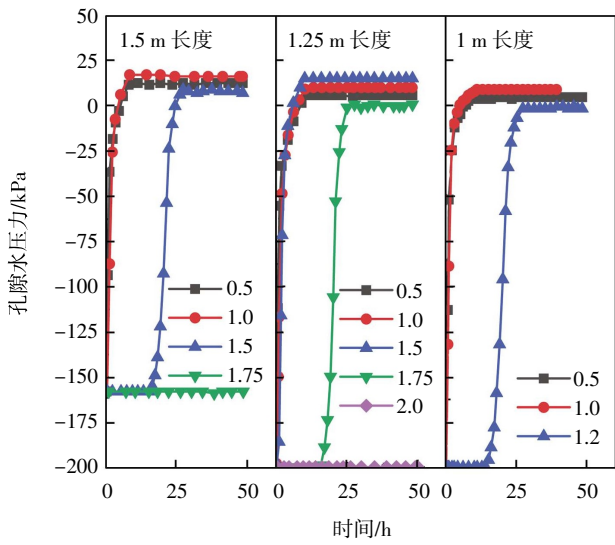
图 8 不同渗井直径影响下的孔压分布

径较小时,其成孔和填筑难度也就较大.因此,工程中可设置渗井直径在 0.1~0.2 m 左右.

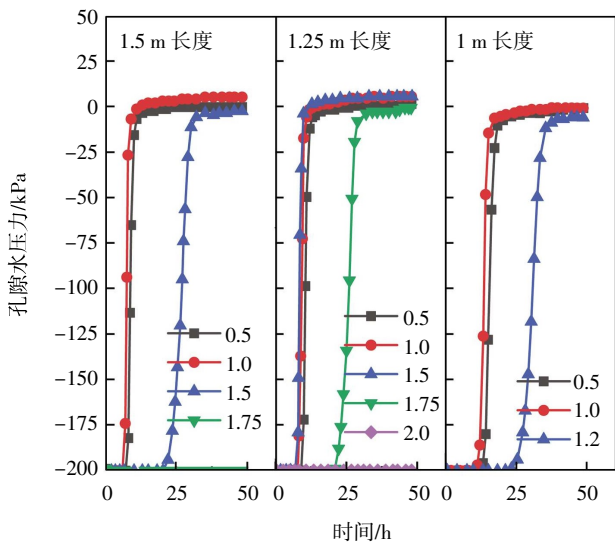
2.2 渗井长度影响下的入渗分析

为探究渗井长度对入渗过程中的影响,在 2.1 节的分析基础上,分别设置渗井长度为 1, 1.25, 1.5 m. 获取的孔隙水压力分布如图 9 所示.

由图 9 可发现,对于比渗井深度小的土体,即高于井底平面的土体,深度对于这部分土体孔隙水压力的影响很小,无论渗井深度如何改变,这部分土体的入渗时间都没有发生显著变化.随着井深的增大,渗井影响的土体深度也相应增加,1 m 井深覆盖不到的 1~1.25 m 深的土体,其短期影响效果也较差.因此设置渗井的深度主要取决于所要求的渗透深度,即应考虑



(a) 渗井轴心不同高度点孔隙水压力分布



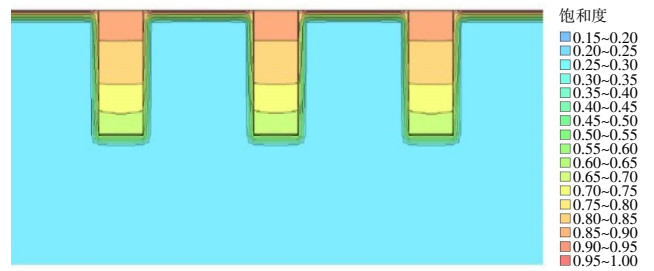
(b) 距渗井轴心 0.45 m 处不同高度点孔隙水压力分布

图9 不同渗井长度影响下的孔压分布

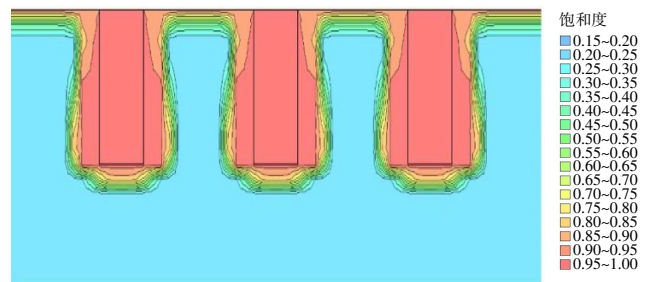
当地强降雨的持续时间.同时,还要结合地下水位线去分析,若使渗井长度触及到地下水位,而地下水潜水、滞水层为饱和或近饱和区间,渗透性较差,而砂石渗井的设计本意为加速土体表面的雨水入渗,同时起到地层蓄水作用,则超过部分也失去了加速雨水入渗的意义.因此,渗井深度的设置具有因地制宜的特征.

2.3 渗井间距影响下的入渗分析

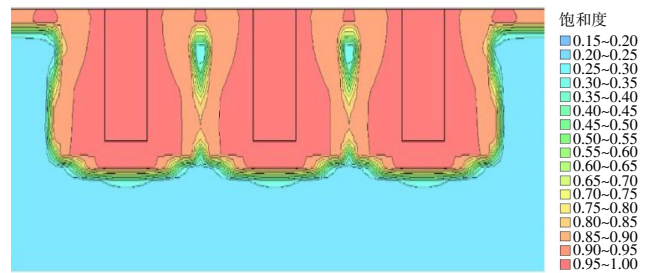
在降水条件、土体性质、边界条件都保持不变的条件下(2.1节),在原有渗井(直径 0.25 m,长度 1.25 m)的基础上增加 2 个相同大小的渗井,渗井中心线之间间距为 1.75,2.75 m. 双侧渗井作用下的饱和度演变,如图 10 所示. 两渗井之间中轴线和无渗井相对位置的孔压分布,如图 11 所示.



(a) 间距 1.75 m 渗井群 1 h 的饱和度分布

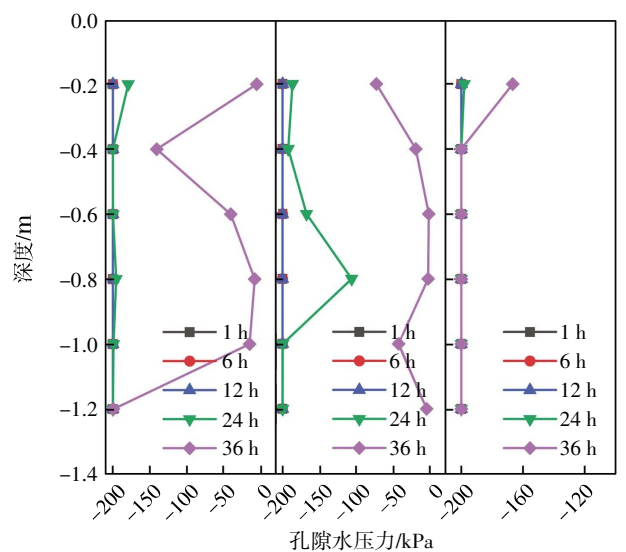


(b) 间距 1.75 m 渗井群 12 h 的饱和度分布



(c) 间距 1.75 m 渗井群 36 h 的饱和度分布

图 10 群井场地的饱和度分布



(a) 单井 (b) 1.75 m 井间距 (c) 2.75 m 井间距

图 11 井间距对场地孔压的影响

由图 10 结合图 11 可知,随着时间的推移,深度相同时多个渗井组相同时间的孔隙水压力,大于单个

渗井组的孔隙水压力. 对于 24, 36 h 而言, 部分深度处的单个渗井组孔隙水压力反而高于多个渗井组的孔隙水压力. 这是因为经过渗井壁水平向两侧渗透的雨水, 经一定的时间后在两个渗井中间的位置相遇, 抑制了孔隙水压力的增大. 但是, 整体而言, 多个渗井的布置依旧提高了雨水在土中入渗的速率, 并且增加了快速入渗区域的覆盖面积, 使得更多的土体能够迅速吸收水分, 趋于饱和, 并继续入渗. 因此, 布置多个砂石渗井相较于布置单个砂石渗井, 对于雨水在土体中入渗有着更加明显的促进作用.

由图 11 可看出, 随渗井间距的增大, 相同时间内间距更大的渗井无法像间距小的一样覆盖到井间的所有区域, 如需覆盖到井间的所有区域, 越大的间距也就意味需要更长的入渗周期. 但场地大小一定时, 更小的间距也意味着更多的渗井数量, 更高的成本. 在设置渗井间距时, 应当考虑场地所在区域的降水情况, 结合土层的渗透系数, 因地制宜地确定渗井间距.

3 结 论

(1) 无论是否考虑土体存在的各向异性特征, 砂石渗井均能够提升土层的入渗速率. 对于水平渗透系数大于竖向渗透系数的场地而言, 砂石渗井的加速入渗效果更为鲜明.

(2) 土体的雨水入渗过程是瞬态过程, 获取的水分场与时间相关. 孔隙水压力能够反映土层雨水入渗势能, 饱和度能够反映土层的含水状态.

(3) 渗井与土层的接触面是影响渗井加速入渗效果的最重要因素, 渗井建设过程中优先采用直径较小的渗井; 从使用效果上来看, 渗井的设置深度不宜超过地下水位, 并应考虑当地降雨强度和入渗深度要求.

参考文献:

[1] 冉杨涛, 吕伟娅, 袁校柠. 水资源综合利用专项规划评估体

系构建及应用[J]. 深圳大学学报(理工版), 2021, 38(4): 358-366.

[2] 梁 萌, 薛明星, 冯怀平. 新型渗井-透水网格措施的径流调控效果研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(3): 114-122.

[3] 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等. 1961—2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J]. 地理研究, 2014, 33(7): 1335-1347.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51345—2018 海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[5] 刘硕敏, 吴荣芳, 刘灿灿, 等. 海绵校园建设中重力流生态滤池的管理问题与对策[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(3): 261-265.

[6] 冯彦芳, 李顺群, 陈之祥, 等. 基于土体各向异性的雨水入渗渗井试验研究与验证[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(3): 110-115.

[7] 刘焯璇, 李顺群, 胡铁馨, 等. 砂石渗井在黏土地区海绵城市建设中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 113-118.

[8] 朱 希, 李顺群, 冯彦芳, 等. 建筑垃圾雨水渗井在海绵城市中的应用[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(4): 1415-1421.

[9] 李心萍. 我国明确海绵城市建设“时间表”一到 2020 年国内 20%城市建成区能就地消纳 70%降水[N]. 人民日报, 2015-10-10(1).

[10] 李 毅, 任 鑫, HORTON R. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 485-490.

[11] 徐 洪, 马云东. 各向异性土体中渗透系数的讨论[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(1): 104-105.

[12] 侯英剑, 李顺群, 王彦洋. 一种适用于海绵城市建设的渗水构件渗水性能分析[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2019, 39(5): 323-325.

[13] 车生泉, 谢长坤, 陈 丹, 等. 海绵城市理论与技术发展沿革及构建途径[J]. 中国园林, 2015, 31(6): 11-15.

[14] 邵龙潭, 温天德, 郭晓霞. 非饱和土渗透系数的一种测量方法和预测公式[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 806-812.

[15] 邵龙潭. 土力学研究与探索[M]. 北京: 科学出版社, 2011.