

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2406403

滤芯渗井对楼房周边土层入渗响应研究

芮子航, 李顺群, 刘小兰, 张光明
(天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384)

摘要:为了解决老旧小区海绵城市改造问题,将滤芯渗井引入老旧小区海绵城市改造中以提升土层入渗效率.基于Midas模型分析了设置滤芯渗井对楼房及周边土层降雨入渗的影响,探讨了孔隙水压力的响应规律并对滤芯渗井布设方式影响进行研究.结果表明:设置滤芯渗井时,在相同降雨时间内渗井处的孔隙水压力大于未设置渗井的情况,设置滤芯渗井能显著加强降雨期间土层入渗效果;滤芯渗井对于土层入渗加速作用在降雨初期更加明显,随着降雨时间的增长,效果逐渐降低;渗井间距为2 m、单排布设时效果更好.研究结果可用于缓解老旧小区的涝灾,为低影响性开发的海绵城市建设提供科学参考.

关键词:滤芯渗井; 海绵城市; 孔隙水压力; 老旧小区; 土体入渗

中图分类号: TU 992.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-719X(2024)06-0403-07

Study on the Infiltration Response of the Filter Seepage Well on the Soil around Buildings

RUI Zihang, LI Shunqun, LIU Xiaolan, ZHANG Guangming
(School of Civil Engineering, TCU, Tianjin 300384, China)

Abstract: To solve the problem of sponge city of old communities renovation, the filter seepage well was introduced into the sponge city reconstruction of the old communities to improve the infiltration efficiency of soil. Based on the Midas model, the influence of the seepage well on the rainfall infiltration around the single building was analyzed. The response law of pore water pressure was discussed and the influence of the layout of the filter seepage well was studied. The results show that the pore water pressure at the seepage well is greater than that without the seepage well in the same rainfall time, which indicates that the filter seepage well can significantly enhance the infiltration effect of soil. The effect of the filter seepage well on the soil is obvious in the early stage of rainfall and decreases with the increase of rainfall time. The effect is better when the seepage well spacing is 2 m and single row is arranged. The research results can be used to alleviate the waterlogging disaster in old communities and provide scientific reference for the construction of sponge cities with low impact development.

Key words: filter seepage well; sponge cities; pore water pressure; old renovation communities; soil infiltration

随着城市化进程的推进,硬化路面不断增加,城市内涝问题日益突出,居民生产生活受到严重影响,因此实施海绵城市改造是必然趋势^[1-2].一般海绵化措施如绿色屋顶、下凹绿地、透水铺装等主要依靠径流调控雨水入渗来缓解内涝问题^[3-4].受岩土孔隙和裂缝透水能力的限制,天然土体入渗速率随着降雨时间的增长逐渐降低,在表层土体达到饱和后很难进一步入渗,入渗深度一般小于30 cm^[5],导致这些海绵化措施

不能充分利用深层土体保持雨水的功能.同时由于老旧小区内环境复杂、设施老旧,大部分海绵城市措施难以得到有效实施^[6].

鉴于老旧小区海绵化改造困难的现状,寻找一种适用于老旧小区中经济有效的海绵城市开发措施尤为重要^[7-8].相较于其它海绵城市措施,滤芯渗井具有施工便捷、适用性强、对环境影响小等优点.通过滤芯渗井将地面水引向更深的土层中去,在增大雨水入渗

收稿日期: 2023-03-08; 修订日期: 2023-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41872251); 天津市重点研发计划科技支撑重点项目(19YFZCSF00820)

作者简介: 芮子航(1997—),男,河南漯河人,天津城建大学研究生.

通讯作者: 李顺群(1971—),男,河南卫辉人,天津城建大学教授,博士,从事岩土工程研究. E-mail: lishunqun@yeah.net

面积的同时,能够充分利用土层水平渗透能力强的特点,从而提高雨水的入渗效率.将滤芯渗井与地表海绵化方案相结合,还能更好地发挥地表海绵化措施的效果.因此本文提出将滤芯渗井引入老旧小区海绵城市改造之中,并分析其对于土层入渗加速作用.

当前学者已对渗井进行了部分研究.刘焯旋等^[9]通过对透砂石渗井单井和群井的入渗进行分析,表明砂石渗井对地表径流的加速入渗效果显著.侯英剑等^[10]通过原位试验对砂石渗井的渗水性能进行分析,发现在同一深度渗井处的孔隙水压力大于土体的孔隙水压力.梁萌等^[11]通过模型试验对渗井的效果进行了研究,发现渗井-透水网格组合措施对于径流控制效果优于单一透水网格措施.

已有研究多以天然土体为重点,本研究以老旧小区内楼房及周边道路为原型,综合考虑多种地表渗透系数条件下滤芯对于土层的入渗加速作用.研究基于前期海绵城市调研结果,选择了暴雨期间内涝较为严重的天津市建昌里小区进行模拟分析.经过实地调查发现该小区面积较大并且建筑布局较为规整,房屋多为对称分布.因此为了简化模型,选择了部分具有代表性的楼房及周边道路为研究对象.通过 Midas 模拟分析了滤芯渗井对楼房周边降雨入渗的影响,探讨了孔隙水压力的响应规律并对滤芯渗井布置方式影响进行研究,为低影响性海绵城市建设提供科学参考.

1 渗流原理和边界条件

土骨架中包含了相互连通的孔隙,当水进入到土的骨架中,水会在势作用下顺着空隙流动,这就是土体中的渗流现象.由于土体的空隙通道小而曲折,导致渗流过程中流体受到的粘滞阻力过大,流体的流速缓慢,很难向下渗透,流体大都处于层流状态.法国工程师达西进行了大量的试验,得到层流状态下土体中水流速度与水头之间的规律,如式(1)所示.

$$v = \frac{q}{A} = Ki \tag{1}$$

式中, v 为断面平均渗流速度,cm/s; q 为单位渗水量,cm³/s; A 为土样横截面积,cm²; K 为土的渗透系数,cm/s; i 为水力梯度.将达西定律运用于各向异性的土体中得到流体在各个方向上的运动状态^[12],如式(2)~(4)所示.

$$v_x = -K_x \frac{\partial H}{\partial x} \tag{2}$$

$$v_y = -K_y \frac{\partial H}{\partial y} \tag{3}$$

$$v_z = -K_z \frac{\partial H}{\partial z} \tag{4}$$

式中, v_x, v_y, v_z 分别为 x, y, z 方向的渗流速度,cm/s; K_x, K_y, K_z 分别为 x, y, z 方向渗透系数,cm/s.

由于缺少小区实测数据,本模拟采用给定边界为定水头边界,即第一类边界条件^[13-15]:

第一类边界条件为 Γ_1 ,它是渗流区域的边界.各点在任意时刻水头 h 均已知,可直接在边界上赋值,如式(5)所示.

$$h|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t)_{(x,y,z) \in \Gamma_1} \tag{5}$$

2 数值模拟

对数值模型进行如下假设:①土体各向同性且连续均匀,变形较小可忽略不计;②地下水位于地下土层3m处;③水流的流体运动符合达西定律;④土体的泊松比、渗透系数等都为常数;⑤降雨期间不考虑雨水对土体产生的应力作用;⑥模拟单元地势平坦,不考虑单元地形起伏造成的产汇流差异;⑦模拟区域独立且不与周围区域进行水交换.

根据该小区实际情况,将模型主要划分为3个部分:顶部不透水的楼房区域、弱透水的路面区域和人行道透水铺装区域.渗井设置在透水铺装区域下方,布置间距为1m,围绕楼房区域环形布置,共计128处渗井.在渗井旁设置5处水位观测孔以观测地下水位变化.

为了更好的反映滤芯渗井对于土体入渗加速作用的影响,选取环形渗井群长短边中心及角点处的3个节点以重点分析道路中心及转角处的入渗情况.1号节点位于渗井群西侧短边中心,2号节点位于渗井群西北角点,3号节点位于渗井群北侧长边中心.节点位置和设置滤芯渗井时楼房及周边道路示意图,如图1所示.

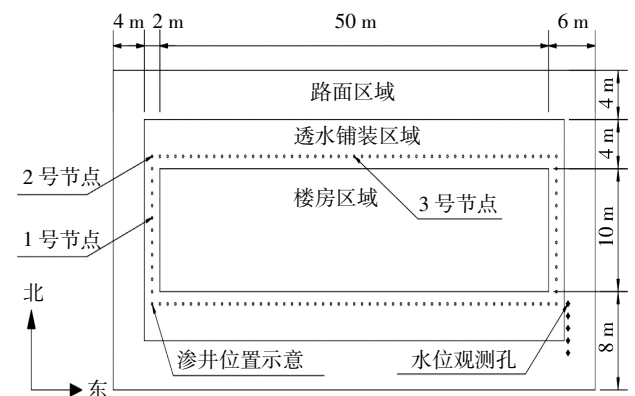


图1 模型平面及节点位置示意图

在模型参数设置中,土层自地表向下分别为 1.1 m 的素填土,1.9 m 的粘土和 2 m 的淤泥土,基于工程常用土体参数的非线性莫尔-库伦模型来模拟土的本构关系.楼房区域属于不透水层,根据天然土体入渗深度,将楼房区域的厚度设为 30 cm 来模拟该区域的不渗透深度,模型选择弹性模型.透水铺装区域为人行道,材料为透水砖,参考《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》(GB 50400—2016)确定其渗透系数,厚度设为 10 cm,模型选择弹性模型.路面区域为弱透水层,共分为面层、基层、垫层 3 部分,路面结构参数见表 1^[6],模型选择弹性模型.渗井滤芯设置于透水铺装区域下方并嵌入素填土层;渗井中的滤芯直径为 0.1 m,高度为 1 m,模型选择弹性模型.土层及铺装参数如表 2 所示.

表 1 路面层参数

物理参数	上面层	中面层	下面层	上基层	下基层	垫层
厚度 d/cm	4	6	8	12	32	18
弹性模量 E/MPa	1 148	984	820	500	1 500	750
渗透系数 $10^{-8}/(m \cdot s^{-1})$	213	107	107	3 000	3 000	3 000

表 2 土层及铺装参数

材料	弹性模量 $E/(kN \cdot m^{-2})$	初始孔隙比	饱和容重 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	渗透系数/ $(m \cdot s^{-1})$
素填土	2 258.3	0.81	21	8.0×10^{-5}
粘土	3 498.0	0.51	21	1.2×10^{-6}
淤泥质土	2 644.0	0.55	21	8.5×10^{-7}
透水砖	4 000.0	0.60	28	2.0×10^{-2}
滤芯	4 000.0	0.50	25	1.0×10^{-2}
楼房区域	3.0×10^7	0.50	21	1.0×10^{-10}

模型网格划分选择 3D 网格,通过尺寸控制网格,土层及道路铺装网格尺寸均设为 1 m,滤芯渗井网格尺寸设为 0.5 m.网格生成选择混合网格生成器,选择匹配相邻面并将相应的属性赋予模型后生成网格.

渗流分析中,对模型施加自重和自动约束.为了考虑土体的非饱和特性^[7],采用非饱和函数,函数类型选取加纳德系数,鉴于缺少实测数据,系数采用软件默认值.根据当地水位数据,初始水头设为-3 m,节点水头位置设在粘土层底部.根据国家气象局颁布的降水强度等级划分标准,小雨 24 h 总降雨量小于 5 mm,经过换算得出降雨速率为 $5.78 \times 10^{-7} m/s$.本模型综合考虑天津市通常降雨情况和降雨时间^[8],最终设置降雨速率设为 $1 \times 10^{-7} m/s$,降雨时间为 2 h.

施工阶段共分为 2 个阶段.第一阶段为初始阶段,反应初始水头情况,激活模型网格组和节点水头.

第二阶段为降雨阶段,反映降雨入渗过程中各时间节点的变化,激活曲面流量.根据降雨时间每隔 10 min 划分 1 个步骤,共记 12 个步骤.在分析控制中考虑非饱和影响,不考虑负孔压力最大值.

3 模拟结果分析

孔隙水压力是由于土中流体的压力作用于土微粒或孔隙之间产生的,土体中流体的渗流速度越慢,流体对于土颗粒或孔隙的压力作用越小,孔隙水压力的值就越小,土体的入渗能力就越弱.基于 Midas 数值模型研究滤芯渗井对楼房周边降雨入渗的影响,探讨未设置渗井和设置渗井时楼房及周边土体孔隙水压力的变化.

3.1 楼房周边未设置渗井时孔压

选择降雨时间为 10 min 和 120 min 的孔隙水压力云图来反映楼房未设置渗井时孔隙水压力整体变化,如图 2 所示.

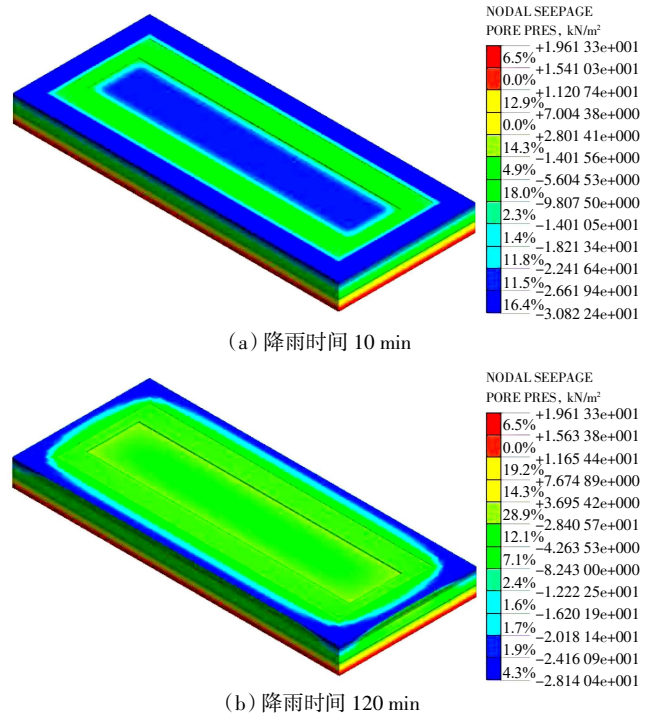


图 2 未设置渗井时孔隙水压力云图

选取 1、2、3 号节点分析未设置渗井时在降雨 120 min 内孔隙水压力变化,如图 3 所示.

云图图例中 NODAL SEEPAGE PORE PRES 为节点处孔隙水压力,单位为 kN/m^2 .由图 2、3 可知,各节点孔隙水压力变化的总体趋势随着降雨时间的增长,各节点的孔隙水压力不断增大.在降雨初期增大速率较为明显,在降雨时间为 20 min 后,孔隙水压力增大

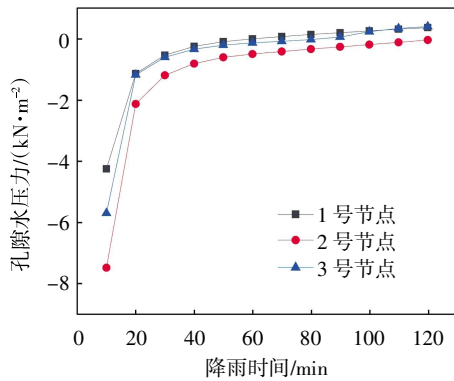


图3 未设置渗井时节点孔隙水压力

的趋势逐渐减缓.这是由于随着降雨时间的不断增长,素填土层逐渐趋于饱和,使得雨水入渗速率减慢.在降雨时间为120 min后,各节点的孔隙水压力值接近.

3.2 楼房周边设置渗井时孔压

选择降雨时间为10 min和120 min的孔隙水压力云图来反映楼房设置渗井时孔隙水压力整体变化,如图4所示.

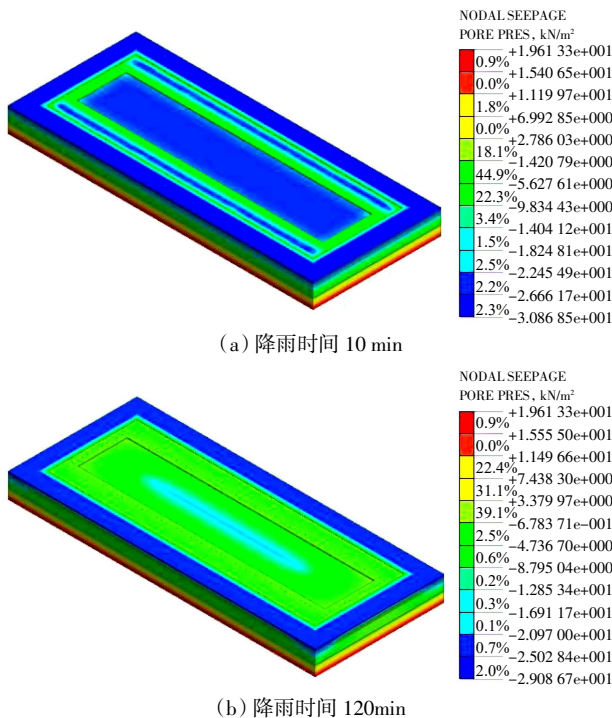


图4 设置渗井时孔隙水压力云图

由图4可知,随着降雨时间的增长,各区域的孔隙水压力不断增大.在降雨达到10 min时,渗井处的孔隙水压力明显大于渗井附近的孔隙水压力.在降雨达到120 min后楼房区域的孔隙水压力持续增大,路面区域孔隙水压力增大不明显,这是由于渗井的作用,使雨水更容易向布置渗井区域深层的地下土体渗透,因此相较于未设置渗井的情况下,渗井处的孔隙

水压力明显大于渗井附近的孔隙水压力.

将未设置渗井时节点记为a节点,设置渗井后的节点记为b节点,120 min内1、2、3号节点位置处的孔隙水压力如图5所示.

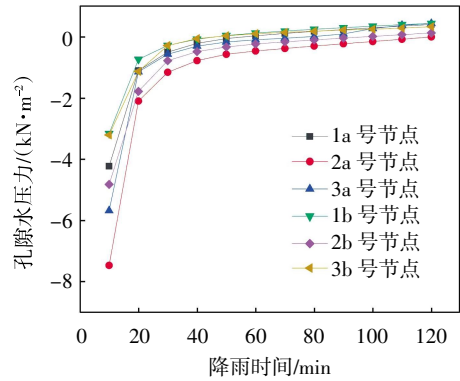


图5 各节点孔隙水压力对比

由图5可知,在设置渗井时,在相同的降雨时间内,渗井处的孔隙水压力大于未设置渗井处的孔隙水压力.降雨时间为10 min时,相比于未设置渗井的情况下,1号节点的孔隙水压力增加了1.064 kN/m²,2号节点的孔隙水压力增加了2.639 kN/m²,3号节点的孔隙水压力增加了2.466 kN/m².各节点孔隙水压力平均提升率为34.6%.

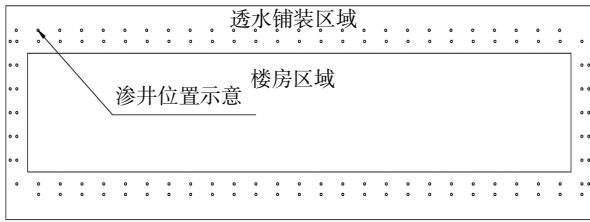
随着降雨时间的增长,2种情况下孔隙水压力大小差异逐渐减小,当降雨时间为120 min时结果趋于相似.降雨时间为120 min时,相比于未设置渗井的情况,1号节点的孔隙水压力增加了0.036 kN/m²,2号节点的孔隙水压力增加了0.132 kN/m²,3号节点的孔隙水减小了0.105 kN/m².

4 布置方式影响

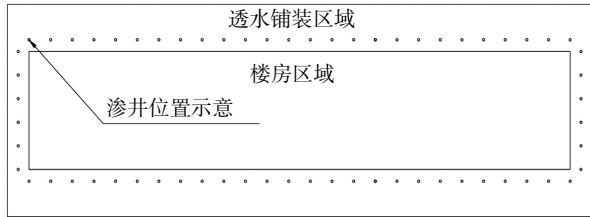
鉴于滤芯渗井的布置方式对其使用效果具有较大影响,为了给不同环境下滤芯渗井的布置方式提供参考,对间距2 m双排设置渗井、间距2 m单排设置渗井两种工况进行分析,以探讨不同布置方式对于滤芯渗井提高土体入渗效果的影响,两种工况的渗井位置示意图如图6所示.

间距2 m双排设置渗井、间距2 m单排设置渗井在降雨10 min和120 min孔隙水压力变化云图分别为图7、图8所示.

间距1 m单排设置渗井工况的节点仍记为b节点,将间距2 m双排设置渗井工况的节点记为c节点,间距2 m单排设置渗井工况的节点记为d节点,在120 min内1、2、3号节点位置处的孔隙水压力如图9所示.

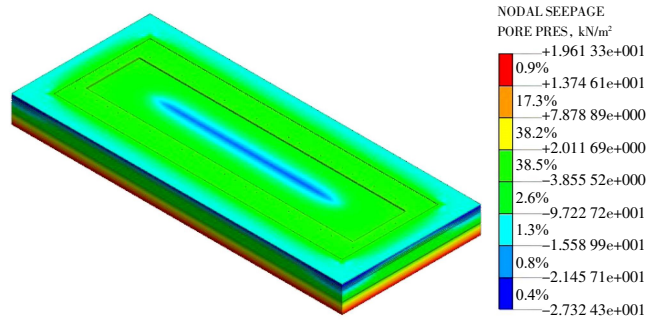


(a) 间距 2 m 双排设置渗井



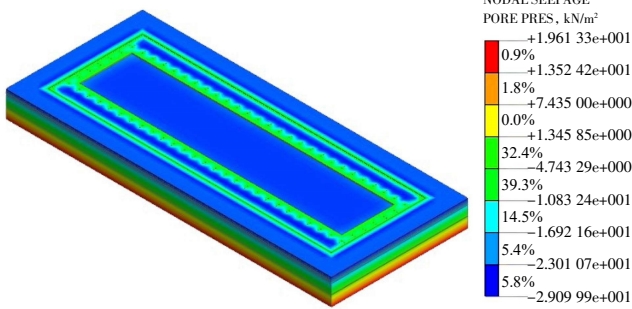
(b) 间距 2 m 单排设置渗井

图 6 渗井布置示意图

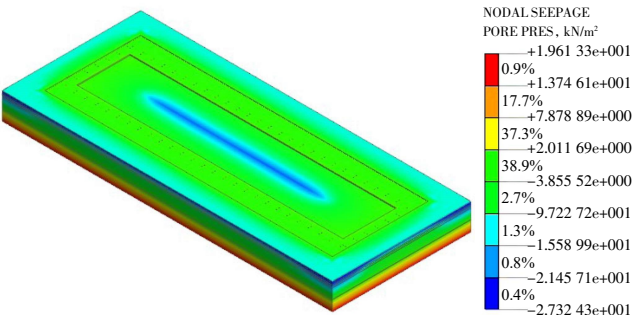


(b) 降雨时间 120 min

图 8 间距 2 m 单排设置渗井孔隙水压力云图

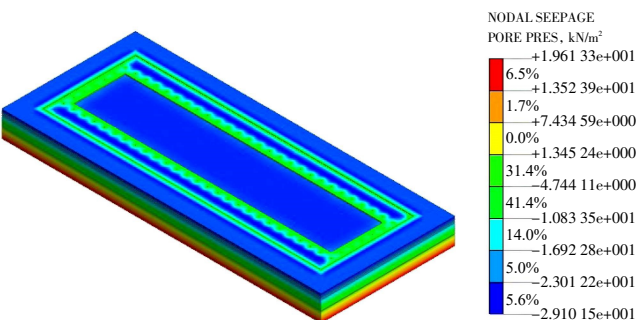


(a) 降雨时间 10 min

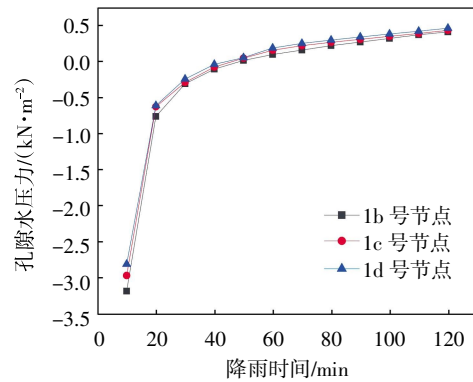


(b) 降雨时间 120 min

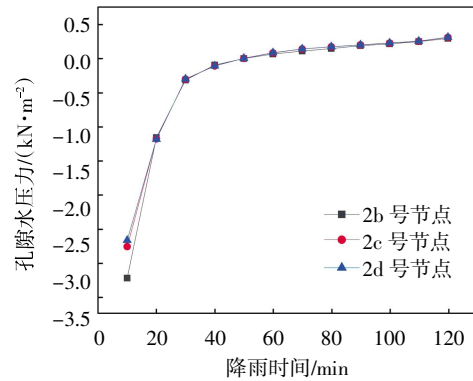
图 7 间距 2 m 双排设置渗井孔隙水压力云图



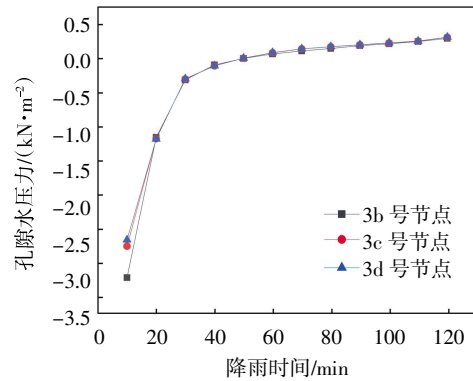
(a) 降雨时间 10 min



(a) 1 号节点孔隙水压力



(b) 2 号节点孔隙水压力



(c) 3 号节点孔隙水压力

图 9 各节点孔隙水压力对比

由图 7、图 8 和图 4 对比可知,当滤芯间距为 2 m 时,雨水入渗范围较于滤芯间距为 1 m 时更广;间距 2 m 渗井双排设置与单排设置之间雨水入渗范围差异较小。

由图 9 可知,降雨 120 min 内,渗井间距为 2 m 时的孔隙水压力较间距为 1 m 时的孔隙水压力平均提升率为 15.3%; 间距 2 m 单排设置渗井的孔隙水压力较间距 2 m 双排设置渗井的孔隙水压力平均提升率为 0.6%。这是由于渗井间距较小时,渗井中雨水入渗相互干扰从而降低了入渗效果,也表明了渗井间距较于渗井布置形式对于入渗效率的影响更大。

5 数值与实测结果对比

地下水位变动主要随着自然的地下水迁移以及降雨入渗的作用发生改变,在雨后的变化规律能反映降雨入渗的情况。通过渗井旁间隔 1 m 设置的 5 个水位观测孔进行长期水位监测验证模拟结果的准确性。

记地面为基准面,地表以下向地下水位的方面为正方向,由北向南依次为 1~5 号水位观测孔。雨季 3 个月内的降雨情况如表 3 所示,试验场地的地下水位变化规律如图 10 所示。

表 3 降雨情况

观测天数/d	12	33	42	67	100
降雨分级	中雨	大雨	大雨	暴雨	大雨
降雨量/mm	7	25	50	80	18

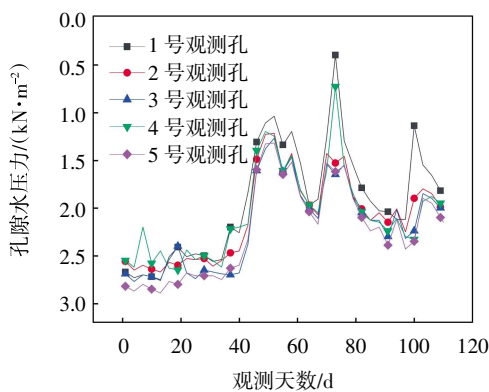


图 10 地下水位变化

由图 10 可知,在降雨后地下水位会发生明显的上升,降雨量越大地下水位上升趋势越快、地下水位变化越明显;在降雨过后,地下水位会随着时间发生明显回落,趋向于降雨前水位高度。1 号水位观测孔在降雨后地下水位的变化量始终高于其他水位观测孔,且观测孔水位变化量随着编号数值的变大而减小。表

明了越靠近渗井处的入渗量越大,这与模拟结果相匹配,与模拟结果相互验证。

6 结论

针对老旧小区海绵城市改造困难的问题,研究提出将滤芯渗井引入老旧小区海绵城市建设中,基于 Midas 数值模型研究楼房设置滤芯渗井后的土层入渗加速作用具体研究结论如下:

(1)设置滤芯渗井时,相同降雨时间内滤芯渗井处的孔隙水压力大于未设置滤芯渗井处的孔隙水压力。在降雨 10 min 时,各节点孔隙水压力平均提升率为 34.6%。且在降雨前 1 h 内,滤芯渗井对于楼房下土体入渗加速效果明显。随着降雨时间的增长,滤芯渗井对于土体入渗加速效果逐渐降低。

(2)渗井间距为 2 m 时的入渗效果要优于间距为 1m 时的入渗效果,滤芯渗井单排环形布设的方式优于双排布置。渗井间距为 2 m 时的孔隙水压力较间距为 1 m 时的孔隙水压力平均提升率为 15.3%,间距 2 m 单排设置渗井的孔隙水压力较间距 2 m 双排设置渗井的孔隙水压力平均提升率为 0.6%。

(3)该研究结果表明,在降雨过程中,尤其是在降雨初期阶段,设置滤芯渗井能够有效的加速楼房地下土体的入渗效率。对于解决老旧小区内道路积水,降低内涝风险起到良好的效果,为海绵城市建设提供科学参考。

参考文献:

- [1] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 给水排水, 2015,51(3): 1-7.
- [2] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展,2016,27(6): 793-799.
- [3] ELLIOTT A H, TROWSDALE S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage[J]. Environmental Modelling & Software, 2007,22(3): 394-405.
- [4] 陈 韬,夏蒙蒙,刘云鹏,等. 基于 SWMM 的海绵改建小区雨水径流调控研究[J]. 中国给水排水,2020,36(11): 103-111.
- [5] 周根郑. 成都黏土降雨入渗规律研究 [J]. 水文,2021,41(4): 8-12.
- [6] 程学磊,刘 彦,海 然,等. 透水滤芯渗井技术及其在城市海绵化改造应用研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021,52(8): 66-75.
- [7] WRIGHT T J, LIU Y Z, CARROLL N J, et al. Retrofitting LID practices into existing neighborhoods: Is it worth it? [J]. Environmental Management, 2016,57(4): 856-867.

- [8] 孔俊婷,龚航,刁鹏. 天津市老旧小区海绵化改造策略研究[J]. 建筑节能,2019,47(5): 124-128.
- [9] 刘烨璇,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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 加勒尼. 基于 ANSYS 的某湖堤渗流场模拟分析研究[J]. 水利科技与经济,2020,26(10): 26-31.
- [13] 方燕. 边坡降雨入渗的饱和-非饱和有限元数值分析[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版),2010,20(3): 92-94.
- [14] 王成华,张燕青. 饱和-非饱和土渗流数值分析方法综述[J]. 建筑技术,2016,47(5): 5.
- [15] 年庚乾,陈忠辉,张凌凡,等. 边坡降雨入渗问题中两种边界条件的处理及应用 [J]. 岩土力学,2020,41(12): 4105-4115.
- [16] CUI X Z. Dynamic numerical analysis of antimoisture-damage mechanism of permeable pavement base [J]. International Journal of Geomechanics,2010,10(6): 230-235.
- [17] 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.
- [18] 胡蓓蓓,王军,许世远,等. 天津市近 50a 来降水变化分析[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(8): 71-74.