

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.04.004

降雨作用下排水钉的性能及其对渗流场的影响

刘恒¹, 余帅会¹, 龚申¹, 聂如松²

(1. 中土集团福州勘察设计院有限公司, 福建 福州 350013;

2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为探究降雨入渗作用下排水钉的排水性能及其对土体渗流场的影响, 通过开展室内试验、建立排水钉数值模型、定义流量函数模拟降雨入渗过程, 分析排水钉排水量及土体中体积含水率和孔隙水压力的变化规律。结果表明: 随着降雨时间的增加, 排水钉排水量不断增大直至最大值, 排水量处于最大值一段时间后, 土体表面积水入渗完成, 排水量开始大幅减小; 随着降雨入渗的发展, 各监测点处体积含水率均达到土体饱和体积含水率, 各处孔隙水压力值由负变正, 降雨停止后, 由于排水钉的排水作用, 各处体积含水率均不断减小; 最终, 各监测点处体积含水率均小于初始状态, 孔隙水压力值由正变负。数值模拟结果能与室内试验结果具有良好的一致性。研究结果说明排水钉具有良好的排水效果, 可有效解决工程中降水的排出问题, 能够为工程的排水设计提供借鉴。

关键词: 降雨入渗; 排水钉; 排水量; 体积含水率; 孔隙水压力

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)04-0327-05

Performance of drainage nail under rainfall and its influence on seepage fields

LIU Heng¹, YU Shuaihui¹, GONG Shen¹, NIE Rusong²

(1. CCECC Fuzhou Survey & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350013, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to investigate the drainage performance of the drainage nail and its influence on the soil seepage field, laboratory tests were conducted so as to establish the numerical model of the drainage nail, and define the flow function to simulate the drainage infiltration process, and the drainage water volume and the changes of volumetric water content and pore water pressure in the soil were analyzed. Results show that the drainage water volume of the drainage nail increases to a maximum value as the rainfall time increases, then the drainage water volume keeps at its peak for a period of time; the drainage water volume decreases rapidly after a while owing to the completion of water infiltration on the soil surface. With the development of rainfall infiltration, the volumetric water content at each monitoring point reaches the saturated volumetric water content, and the pore water pressure changes from negative to positive. Due to the drainage effect of the nail, the volumetric water content at each monitoring point decreased continuously after the rainfall stopped. Finally, the volumetric water content at each monitoring point was smaller than the initial state, and the pore water pressure value changed from positive to negative. The numerical simulation results are consistent with the laboratory tests. Such results show that the drainage nail has good drainage effects, which can effectively solve the problem of drainage in engineering and provide reference for drainage design.

Keywords: rainfall infiltration; drainage nail; water drainage; volumetric water content; pore water pressure

收稿日期: 2021-04-26

第一作者简介: 刘恒(1987—), 男, 福建福州人, 高级工程师, 硕士, 研究方向: 路基工程设计与研究。

为解决传统排水管易堵塞失效等问题,长沙铁研交通工程有限公司^[1]开发了一种适用于新建和既有线边坡的内部排水结构——排水钉,目前已在多处实际工程中使用并取得良好效果^[2]。排水钉在结构上包括排水钉节段及特制的排水钉接头,其中排水钉节段由 PVC 管外裹一层毛细透排水带而成。毛细透排水带具有独特的“Ω”型断面构造,能在一定范围内形成天然反滤层、阻止土颗粒进入排水通道、确保排水效率不随时间推移而降低,从而被广泛应用于大坝治理、盐碱化治理、废水处理、垃圾填埋场渗流液导排等。张素磊^[3]、姜旭荣^[4]等人通过研究表明了毛细排水带有很好的反滤作用。但毛细透排水带铺设作业面大,不利于在既有工程中使用,长沙铁研交通工程有限公司将毛细透排水带与 PVC 管结合,制成管状结构,形成新型排水结构——排水钉。冷伍明等^[5]通过开展室内试验,探究了综合渗透系数与水钉倾角、水头的关系。郭一鹏等^[6]在室内开展了历时 4 个月的 PVC 排水管和排水钉的排水对比试验,系统研究两者的排水性能和抗淤堵性能;同时开展排水钉设置间距和设置长度对其排水性能的影响试验,并分析排水钉的反滤机制。郭一鹏等^[7]根据连续性原理,建立地下水运动基本方程,针对地下水位变化分别推导排水钉排水的稳定渗流模型(地下水位恒定)和非稳定渗流模型(地下水位下降或上升),得到不同渗流状态下的排水间距及排水量的解析解,进而得到排水钉的设置间距。上述学者在研究排水钉排水特性以及设计参数方面取得了一定的成果,但对于降雨作用下排水钉排水对边坡渗流场的影响尚未见研究。因此,本课题通过开展室内排水试验及数值仿真分析,探究土体渗流场在排水钉作用下的变化规律。

1 降雨作用下排水钉排水试验

1.1 试验装置

试验装置主要由 4 部分组成,包括模型箱、降雨喷头、水箱以及水泵。其中,模型箱长宽高尺寸为 60 cm×60 cm×80 cm。模型箱顶部开口,除在模型箱一侧距箱底 10 cm 处开直径为 6.3 cm 圆孔用以安装水钉的集水管外,侧面及底部封闭。水泵的流量为 1 900 L/h,扬程为 5 m,额定功率为 50 W,工作压力为 0.4~0.8 MPa。降雨喷头喷射

流量为 120~160 mL/min,散射角度 60°~80°,喷射距离为 0.5~1.0 m。

试验选用降雨型喷头模拟降雨。在试验箱顶部借助铁丝网和胶带将喷头固定住,防止喷口位置以及降雨方向发生变化。在试验开始前,对降雨强度及降雨均匀度进行标定,使降雨均匀度达到要求。试验用排水钉长 30 cm,直径 6.3 cm,一端有专门堵头,另一端利用专用接头与集水管连接,将排水钉收集的水排出箱体,具体结构如图 1 所示。

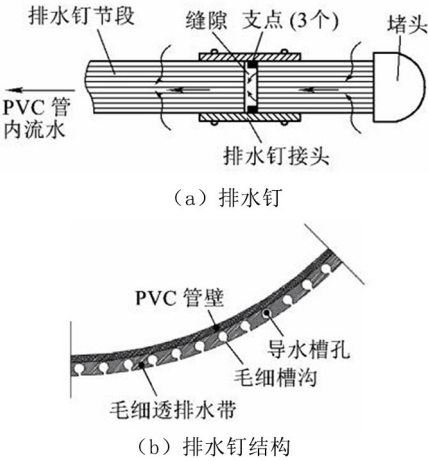


图 1 排水钉结构示意图

Fig.1 Schematic structure of drainage nail

1.2 试验用土

试验所用土样为粉细砂,依据《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)^[8],对其开展颗粒分析试验、颗粒密度试验、相对密度试验、常水头渗透试验,得到试验用土级配曲线如图 2 所示。试验用土颗粒相对密度 $G_s = 2.697$,最大孔隙比 $e_{max} = 0.92$,最小孔隙比 $e_{min} = 0.59$,最优含水率为 14%,最大干密度为 1.71 g/cm³,渗透系数 $k = 1.609 \times 10^{-3}$ cm/s。

1.3 试验过程

1.3.1 试样制备

将现场取回的粉细砂烘干后加水拌和,控制试样初始含水率为 14%。

1.3.2 装样过程

(1) 分层装样

试样分 5 层填筑,每层填筑高度为 10 cm,依据所配土样干密度 1.6 g/cm³和所设初始含水率 14%,确定每层填土质量,如公式(1)。

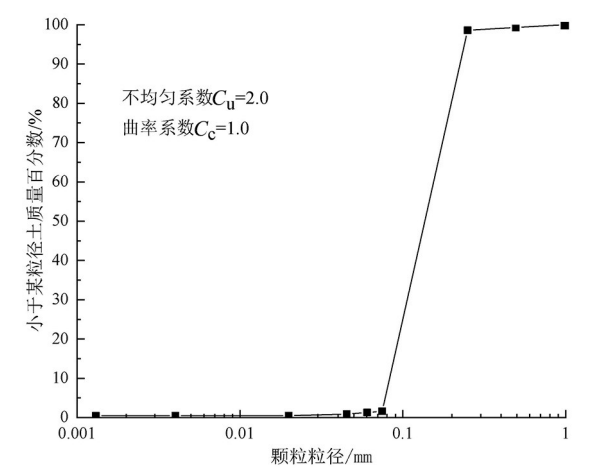


图 2 颗粒级配曲线

Fig.2 Gradation curve for the tested soil

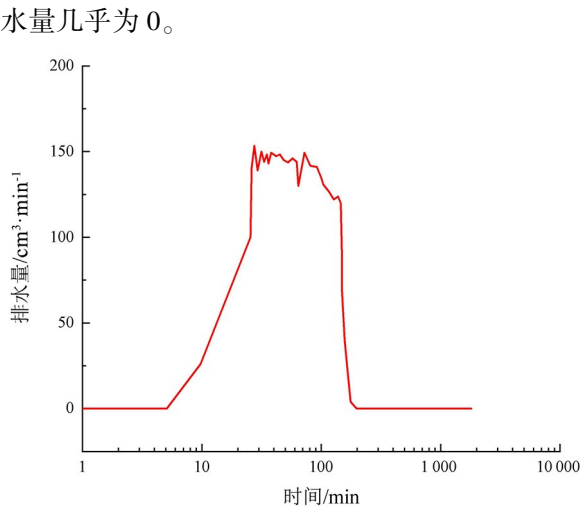


图 3 水流量随时间变化图

Fig.3 Variation of water discharge with time

$$m_{\text{总}} = m_s + m_w = m_s(1 + w) = \rho_d V(1 + w) \tag{1}$$

式中, $m_{\text{总}}$ 为砂土试样总质量 (kg); m_s 为砂土试样中砂的质量 (kg); m_w 为砂土试样中水的质量 (kg); w 为质量含水率 (%); ρ_d 为砂土试样中砂的干密度 (kg/m^3); V 为夯实后每层砂土试样的体积 (m^3)。

对样土夯实到指定高度后,取 4~6 点用环刀法测密度,并用烘干法测含水率,以确保夯实效果。

(2)排水钉安装

第一层土样填筑完成后,安装排水钉。为满足水钉以 5° 倾角布置,将排水钉通过专门的接头、弯管与 PVC 集水管相连,利用集水管将排水钉收集的水排出模型箱。

1.3.3 降雨过程

模型箱填筑完成后,安装降雨喷头。旋转调压阀至预定位置,按 $1.79 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 的降雨强度开启降雨装置,持续降雨 1.5 h 后,用称重法测量排水钉排水量。待出水孔没有水流出后,停止试验。

2 试验结果

图 3 为排水钉排水量随时间变化图,由图 3 可知,降雨 6 min 后开始有水流从排水管流出,随着降雨时间的延长,排水量不断增大,当降雨 25 min 时,排水量达到最大值,约为 $150 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。在接下来的 65 min,排水量值在 $150 \text{ cm}^3/\text{min}$ 附近波动。随后,排水量随时间逐渐减小,在 110 min 左右,排水量减小速率骤增,在 180 min 时,排

3 排水数值仿真分析

采用 Geostudio 软件对降雨过程中排水钉的排水数值进行模拟。

3.1 计算模型

(1)几何模型

模型尺寸与室内降雨入渗排水钉排水试验尺寸一致,采用四边形和三角形单元划分网格,共计 164 节点、139 单元,如图 4 所示。

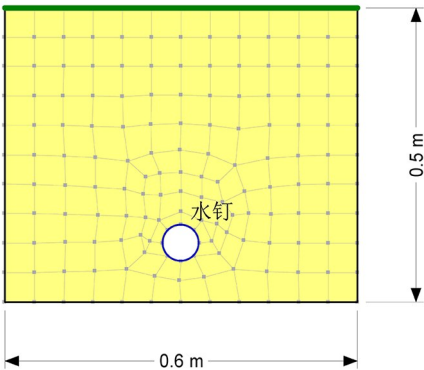


图 4 网格划分示意图

Fig.4 Schematic diagram of meshing

(2)边界条件

为探究降雨入渗作用下的排水性能,需定义相应的水力边界条件,将模型两侧及底部设置为不透水边界。模型顶面为降雨入渗边界,根据降雨强度及降雨持续时间定义流量函数,按单位流量边界条件处理。通过赋予排水钉的排水边界条件,达到模型中的排水效果。在排水钉外围的每

一个节点处,水压和流速需要作为 SEEP/W 求解的一部分来确定,可以通过使该排水钉外边界成为潜在渗水面检验边界条件得以实现。因此,将水流量为 0 设置为排水边界条件,并勾选潜在渗水面检验选项。

(3)初始条件

降雨入渗过程与模型初始条件密切相关,定义合理的初始条件是获得正确解答的前提。由于土体具有一致的初始含水率,因此将孔隙水压力归零设置为模型的初始条件。

3.2 土体参数

根据现有条件基础,本研究采用程序内置的典型样本函数法确定土体的土水特征曲线,在此基础上,根据 V-G 模型预测非饱和和渗透系数函数,如图 5 所示。

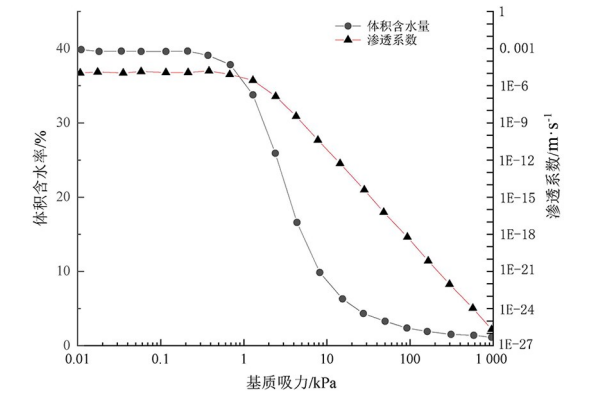


图 5 土水特征曲线及渗透系数曲线

Fig.5 Curves of soil-water characteristic and permeability coefficient

3.3 结果及对比分析

3.3.1 排水量结果

图 6 为试验得到的排水钉排水量与数值模拟结果对比。数值模拟结果显示水钉自 12 min 开始排水,比试验结果晚 6 min。随着降雨时间的延长,排水量不断增大,当降雨 35 min 后排水量达到最大值,最大值与试验结果接近,排水量保持最大值状态约 55 min。随后,排水量减小速率由大变小。数值模拟结果与试验结果总体上具有良好的一致性。

3.3.2 体积含水率变化结果

为探究降雨作用下排水钉对土体渗流场的影响,以模型左下角为坐标原点,在(0.3 m,0.2 m)、(0.3 m,0.3 m)及(0.3 m,0.4 m)3 个点处各设一

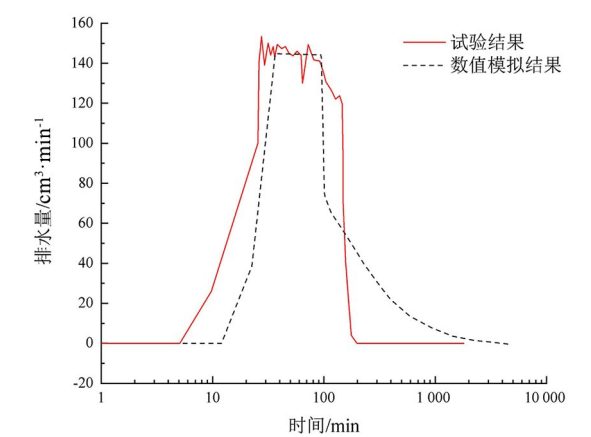


图 6 水流量对比

Fig.6 Water discharge comparison

个监测点(分别为 1#、2#及 3#点),得到各监测点处体积含水率随时间变化规律,如图 7 所示。从图 7 可以看出,降雨初始,3 个监测点处体积含水率均无明显变化。降雨 5 min 时,最靠近试样顶面的监测点 3 处的体积含水率开始增大,随后,监测点 1#、2#处的体积含水率也开始增大,直到土体饱和体积含水率 40%,3 个监测点处的体积含水率值均在 40%持续一段时间,表明土体已在降雨作用下达到了饱和状态。降雨停止,三者体积含水率均未迅速减小。110 min 时,监测点 2#、3#体积含水率开始减小,由于有上部水流补给,监测点 2#的体积含水率大于监测点 3#。200 min 时,监测点 1#体积含水率开始减小。同样地,由于有上部水流补给,监测点 1#的体积含水率大于监测点 2#、3#。在排水钉的排水作用下,3 个监测点处体积含水率最终均小于初始状态。

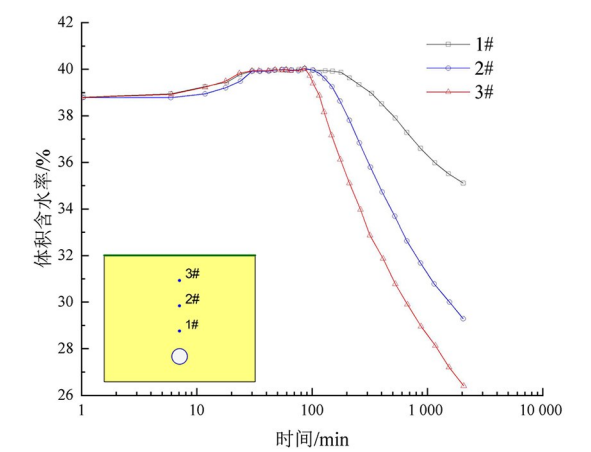


图 7 体积含水率变化图

Fig.7 Variation of volumetric water content with time

3.3.3 孔隙水压力结果

图 8 为孔隙水压力随时间变化图。由于土体初始为非饱和状态,因此各监测点处孔隙水压力均为负值。随着降雨入渗的发展,各监测点处孔隙水压力均不断增大,降雨 35 min,各监测点处孔隙水压力达到最大值,且三者孔隙水压力最大值有如下规律:监测点 3#>监测点 2#>监测点 1#。由于降雨强度大于土体饱和和渗透系数,试验过程中试样顶面出现了积水,因此各监测点处孔隙水压力值达到最大值后在一段时间内保持不变。降雨停止后,孔隙水压力未迅速减小,至土体表面积水入渗完成,孔隙水压力减小速率骤增。在排水钉的排水作用下,各监测点处孔隙水压力值由正变负。由于下方土体受到上方土体的水分补给,各监测点处孔隙水压力最终有如下规律:监测点 1#>监测点 2#>监测点 3#。

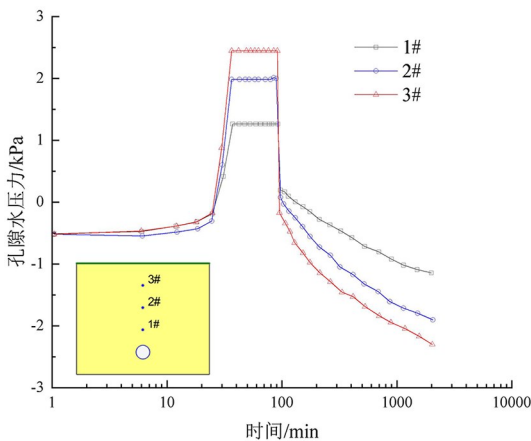


图 8 孔隙水压力变化图

Fig.8 Variation of pore water pressure with time

4 结论

通过开展室内降雨入渗作用下排水钉排水试验与数值仿真计算,分析了排水钉排水量及土体渗流场变化规律,得到了如下结论:

1)随着降雨时间的延长,排水钉排水量不断增大直至最大值,随后,排水量将在一段时间内保持在该最大值附近。降雨结束后,待土体表面积水入渗完成,排水量才开始大幅减小。

2)降雨初始,靠近土体表面位置体积含水率最先增大;随着入渗量的增多,最终排水钉上部各处均达到饱和状态。降雨停止后,由于排水钉的排水作用,各处体积含水率均不断减小,三个监测点处体积最终含水率均小于初始状态。

3)随着降雨入渗的发展,孔隙水压力值由负变正,且越靠近土体表面,其孔隙水压力值越大,降雨停止后,孔隙水压力未迅速减小,至土体表面积水入渗完成,孔隙水压力减小速率骤增。在排水钉的排水作用下,各监测点处孔隙水压力值最终由正变负。

研究结果表明,在降雨条件下,排水钉可显著影响土体含水率及孔隙水压力,使饱和水加快排出土体从而增强土体强度;所建模型可较好模拟土体渗流场的变化情况对排水钉在工程中的应用具指导意义。

参考文献:

[1] 冷伍明,谭敦枝,赵春彦,等. 一种用于铁路路基边坡的水钉排水系统:CN205474898U[P]. 2016-08-17.
[2] 尹进. 边坡挡墙水钉高效排水技术综述[J]. 住宅与房地产, 2020(9):215-216
[3] 张素磊,丰权章,应国刚,等. 公路隧道渗漏水成因及新型排水材料现场试验研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(10):86-91, 140.
[4] 姜旭荣,涂欣华. 公路隧道渗漏水成因及新型排水材料现场试验分析[J]. 交通世界, 2019(21):124-125, 127.
[5] 冷伍明,郭一鹏,聂如松,等. 一种新型排水结构及其排水性能初探[J]. 铁道学报, 2017, 39(7):151-158.
[6] 郭一鹏,冷伍明,聂如松,等. 一种新型排水结构的排水性能试验研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(4):133-141.
[7] 郭一鹏,冷伍明,杨奇,等. 毛细透排水管排水渗流模型及设置间距研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(4):8-13.
[8] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S]. 北京:中国计划出版社, 2019.

(责任编辑:方素华)