

文章编号:1673-9469(2023)01-0021-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.01.004

均质 SAP 复合土质覆盖层水分运移规律研究

吴跃东^{1,2}, 陆韶鹏^{1,2*}, 刘 坚^{1,2,3}, 吴回国^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤防工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了提高覆盖层的防渗性能, 提出采用高性能吸水性树脂(SAP)颗粒提升土体的储水能力, 掺入土中构建均质 SAP 复合土质覆盖层, 然而其水分运移规律尚不明确。开展了一系列简易蒸发单元试验和土柱模型试验, 测量了 SAP 复合土质覆盖层不同深度孔隙水压力和体积含水量的变化。研究表明, 质量分数 1% 的 SAP 颗粒掺入土中形成的 SAP 混合土体, 饱和体积含水量增加了 29%, 土水特征曲线中下降段的斜率绝对值增加了 36%, 但进气值几乎无变化。在失水过程中孔隙水压力降低较快, 而体积含水量降低明显较慢, 存在较强的滞回效应。覆盖层中的 SAP 混合土体的体积含水量(储水量)随着深度的增加而减少。在南京地区百年一遇的极端降雨条件下, 均质 SAP 复合土层下渗量仅为 12.7 mL, 而均质砂土层渗流量高达 2 510 mL, 说明防渗性能良好。

关键词: 填埋场; 覆盖系统; 高性能吸水性树脂; 非饱和土体渗流; 防渗性能

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study on Rainfall Infiltration of a Homogeneous SAP-Enhanced Cover

WU Yuedong^{1,2}, LU Shaopeng^{1,2*}, LIU Jian^{1,2,3}, WU Huiguo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Geotechnical Engineering Research Center of Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to improve the anti-seepage performance of the cover, this paper aims to use super absorbent polymer (SAP) particles to improve the water storage capacity of the soil, and to mix them into the soil to build an SAP composite soil cover, but the law of water movement is still unclear. In this paper, a series of simple evaporation unit tests and soil column model tests were carried out to measure the changes of the pore water pressure and volume water content in SAP composite soil cover at different depths. The results showed that the saturated volume water content of SAP mixed soil formed by mixing 1% SAP particles into the soil increased by 29%, and the absolute value of the slope in the descending section of the soil water characteristic curve increased by 36%, but the air intake value hardly changed. In the process of water loss, the pore water pressure decreased rapidly, while the volume water content decreased slowly, and there was a strong hysteresis effect. The volume water content (water storage) of SAP composite soil cover decreased with the increase of depth. Under the extreme rainfall condition of once-in-a-century in Nanjing, the infiltration amount of SAP was only 12.7 ml, while that of homogeneous sandy soil cover is 2 510 ml, indicating that the anti-seepage performance is good.

Key words: landfill; cover system; super absorbent polymer; unsaturated flow; impervious performance

收稿日期:2022-06-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608152);中央高校基本科研业务费专项资金资助(B210202034, B200204036, B200204032)

作者简介:吴跃东(1969-),男,福建云霄人,博士,教授,主要从事环境岩土、非饱和土体渗流方面的研究。

* 通讯作者:陆韶鹏(1997-),男,江苏昆山人,硕士研究生,主要从事填埋场覆盖系统防渗方面的研究。

近年来,城市垃圾焚烧占比量逐年增加,所产生的飞灰因含有毒性较高的重金属、二噁英等,被定义为危险废弃物。2020年全国飞灰产量已达到1 000万吨,针对飞灰螯合物处理的填埋场不仅数量多,而且还面临着新的技术问题。对于飞灰填埋场来说,一旦雨水入渗至飞灰填埋体中,就增加了飞灰渗滤液渗出的可能,如今填埋场等年产有毒有害渗滤液达5 000多万吨^[1-2],对人类健康和环境带来巨大危害。因此飞灰填埋场的防渗要求高于生活垃圾填埋场标准,一定程度上和危险废物的安全填埋场的防渗等级一致^[3]。

覆盖层,作为一种高性价比的主动阻水结构,已作为重要的防渗措施广泛用于垃圾填埋场、边坡和尾矿坝^[4]等构筑物中。在使用初期,覆盖层形式为单一压实土层,但单一压实土层会产生裂隙,影响其渗透性。非饱和粘土渗透性受吸力影响也较大^[5]。为了克服以上不足,毛细阻滞覆盖层^[6]受到关注。现有研究已证明毛细阻滞覆盖层在干旱和半干旱地区防渗性能良好。然而,在湿润地区,降雨量大,极端降雨多,雨量超过了细粒土的储水能力。毛细阻滞覆盖层阻水效果失去作用,会发生水分击穿现象。为改善覆盖系统储水能力,杨克^[7]和Chen等^[8]选择在覆盖层的土层材料上进行研究,将生物炭掺入毛细阻滞覆盖系统的上层细粒土,以生物炭的孔隙率与吸附特性增强细粒土储水能力,但是为满足湿润气候区使用要求,生物炭掺量需要达到10%~20%,掺量过大。

为了提高覆盖层土体的储水能力,本文针对土体孔隙储水能力不足的问题,提出了固态颗粒吸水新形式,将高性能吸水性树脂(Super Absorbent Polymer, SAP)^[9]掺入覆盖土层中,构建成SAP土质覆盖层,提升其储水能力,使此种新型覆盖层也能满足湿润气候条件下填埋场的防渗要求。本文将通过土柱模型试验分析SAP土质覆盖层的水分运移规律,初步研究在湿润气候和极端降雨条件下的防渗性能,为此后SAP土质覆盖层在实际降雨及干湿循环条件下的研究提供理论基础,为SAP土质覆盖层的应用提供试验依据,同时也为此后将SAP加入毛细阻滞覆盖层的细粒土中形成新型毛细阻滞覆盖系统提供参考。

1 土柱模型试验

1.1 土柱试验方案

为了研究SAP土质覆盖层的水分运移规律和

防渗性能,本文开展2组土柱试验,如表1所列。为了模拟土质防渗性能最不利情况,所有试验采用南京当地砂土,SAP混合土体则在南京砂土基础上掺入砂土质量分数为1%的SAP颗粒混合而成。为了便于比较,单层的均质砂土层和单层的均质SAP混合土层的厚度一致,均控制在45 cm。通过对比第1组和第2组试验的结果,研究SAP对于覆盖层储水能力和阻水效果的提升。本文主要集中于研究极端降雨条件下SAP土质覆盖层的防渗性能,干湿循环复杂情况将在后续研究中开展。

表1 土柱试验方案

Tab. 1 Soil column test plan

试验编号	试验名称	深度0~45 cm 试验土体	目的
1	单层均质SAP混合土层	SAP混合土体	研究SAP复合土质覆盖层水分运移规律
2	单层均质砂土层	砂土	参考试验

1.2 试验装置

1.2.1 土柱模型装置

土柱模型装置由壁厚为10 mm的透明有机玻璃筒加工制成,其高度为1 000 mm,内径200 mm,如图1所示。为了便于覆盖层的土体压实操,土柱模型装置分为2小节,每小节高度为500 mm,采用法兰螺栓固定。为了保障每小节土柱之间的密闭性,在两小节之间增设O型橡胶垫片。在法兰螺栓固定过程中,O型橡胶垫片会被挤压,达到止水效果。

在距土柱底部20、40、55 cm三个高度的土柱侧壁左右两侧各开设一个仪器孔,分别用于埋设张力计和水分传感器,测量不同深度土体的孔隙水压力(负值)和体积含水量。为了保障仪器孔处的密闭性,在每个仪器孔安装仪器时均使用密封件^[10]。为了测量水分下渗量,在土柱模型装置的底部侧壁上开设一个排水孔,连接一根直径10 mm的PU透明导管,收集覆盖层的下渗水分至采集瓶中,并采用天平进行测量。

1.2.2 测量仪器

土柱模型试验中测量仪器有张力计、水分传感器和天平。本文所采用的张力计是一种微型装配式张力计,更多张力计信息可参考文献[11]。本文所采用的水分传感器为频域反射仪水分传感器通过标定后测量误差为 ± 0.01 mL/mL,测量范围为0~1 mL/mL。

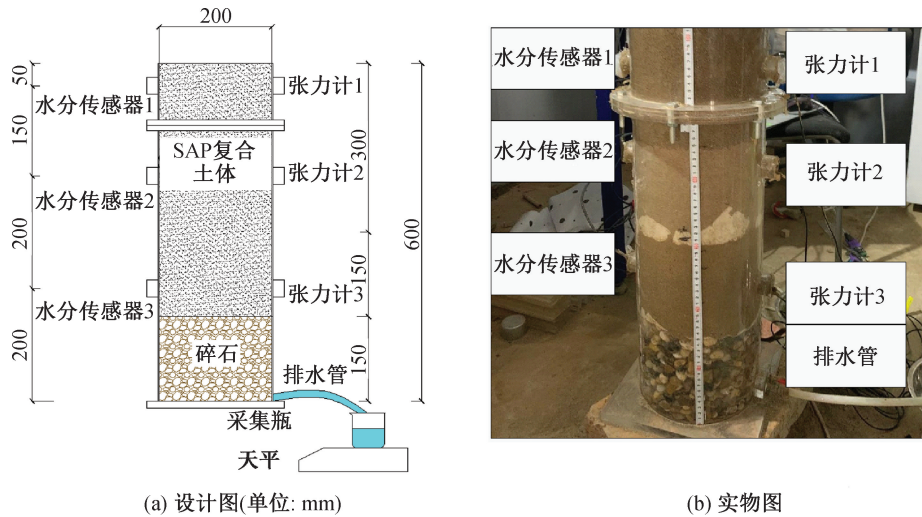


图 1 土柱模型试验布置图

Fig. 1 Layout of soil column test

1.3 材料性质

试验所用的材料主要有砂土和 SAP 颗粒。

1.3.1 砂土物理性质

试验所用的南京当地砂性土为灰色、密实的片状颗粒结构细砂,由长江漫滩、古河道堆积形成。砂土中含石英碎屑、少量的绿泥石、白云母片以及其他黏土质碎裂物和风化矿物。土体初始含水量根据薛雪的调研^[12],参照南京地区砂土初始含水量进行配土,其值为 15%。

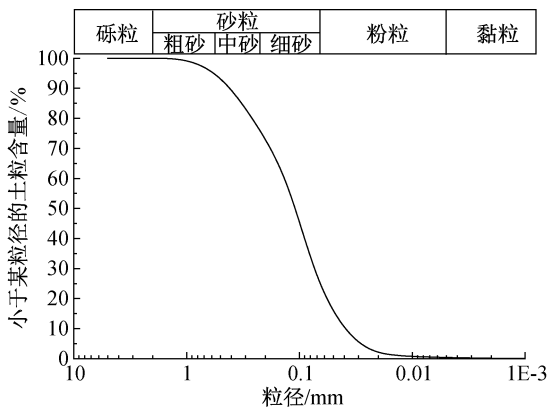


图 2 南京当地砂土的粒径级配曲线

Fig. 2 Particle size grading curve of sand in Nanjing

图 2 给出了砂土的粒径级配曲线,粒径主要分布在 0.075~0.5 mm,平均粒径 d_{50} 为 0.11 mm,粒径小于 0.075 mm 的细粒含量为 26.3%,不均匀系数

C_u 为 3.58,曲率系数 C_c 为 1.05,级配不良。根据土的工程分类标准^[13],该砂土属于粉土质砂(SM)。

1.3.2 SAP 颗粒物理性质

SAP 是一种新型高分子树脂材料,主要化学成分是低交联型聚丙烯酸钠。试验所用的 SAP 颗粒为白色颗粒,粒径为 120~180 目(即 0.083~0.122 mm),如图 3 所示。同土体储水机理不同,SAP 颗粒主要凭借渗透压完成颗粒吸水和放水^[10]。正是由于 SAP 的吸-放水动力来源于渗透压力,所以在机械压力下不易失水,而且吸水和放水过程可以反复进行^[14]。试验所采用的 SAP 颗粒吸收纯水量为 200 倍,具体性质如表 2 所列。

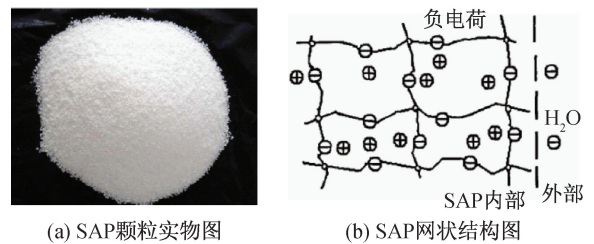


图 3 SAP 颗粒和分子结构图

Fig. 3 SAP particles and molecular structure graph

1.3.3 土体渗透性质

试验所涉及的砂土和 SAP 混合土体饱和渗透系数采用常水头试验进行测试,砂土的饱和渗透系数为 5.97×10^{-5} m/s,而 SAP 混合土体的饱和渗

表 2 SAP 颗粒性质

Tab. 2 Properties of SAP particles

外观	吸收纯水量 $/(g \cdot g^{-1})$	吸水量(0.9 盐水吸收倍率) $/(g \cdot g^{-1})$	离心保水量 $/(g \cdot g^{-1})$	加压吸水量 $/(g \cdot g^{-1})$	pH 值	堆积密度 $/(g \cdot cm^{-3})$
纯白颗粒	200	57	30	18	6.2	0.64

透系数为 3.38×10^{-6} m/s, 比砂土的饱和和渗透系数低 1 个数量级, 这主要由于 SAP 颗粒占据了砂土的孔隙, 降低了孔隙率。

砂土和 SAP 混合土体的土水特征曲线通过简易蒸发试验^[15]进行测量, 试验结果见图 4。其中砂土的饱和体积含水量是 0.38。随着吸力的增加, 体积含水量降低较小。当吸力增加至 2.1 kPa 时, 砂土的体积含水量仅下降了 0.03; 当吸力超过 2.1 kPa 后, 体积含水量降低较大。土体吸力每升高 1 kPa, 体积含水量平均下降 0.033, 这说明砂土的进气值约为 2.1 kPa。当吸力接近 90 kPa 时, 体积含水量已下降至 0。

对于 SAP 混合土体来说, 它的饱和和体积含水量为 0.59, 比砂土高了 55%, 增加的饱和含水量主要来自 SAP 颗粒的储水能力。SAP 混合土体进气值为 1.9 kPa, 比砂土小 0.2 kPa, 这说明 SAP 颗粒对土体进气值影响较小。当 SAP 混合土体的吸力大于进气值之后, 吸力每升高 1 kPa, 体积含水量平均下降 0.045, 这比砂土的下降速率绝对值增加了 36%。这说明在相同吸力下, 相比于砂土, SAP 混合土体具有更大的体积含水量, 储水能力更强。而在相同体积含水量条件下, SAP 混合土体具有更大的吸力, 土体非饱和水平更高。值得注意的是, 在吸力小于进气值时, SAP 混合土体体积含水量变化大于砂土, 这说明 SAP 颗粒在吸力较小时已经开始失水。

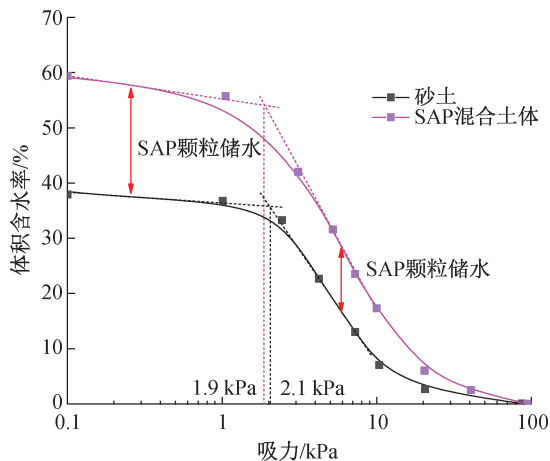


图 4 土体土水特征曲线

Fig. 4 Soil water characteristic curve

1.4 试验步骤

土柱模型试验步骤主要分为准备和开展两个阶段。

1.4.1 准备阶段

在试验开始之前, 首先标定试验中所有张力

计、水分传感器和天平。张力计采用文献[11]中所用的压力板仪进行负压标定, 而水分传感器采用不同含水量的土体进行标定, 土体的含水量采用烘干法测量。天平则采用标准砝码进行标定。

随后组装两个土柱小节, 在仪器孔中安装传感器后, 检测整个土柱的密封性。在密封性检测过程中, 向已安装好的土柱中注水至覆盖层顶部高程处, 静置 24 h, 检查是否漏水。如果漏水, 要进行防渗加固, 直至土柱装置的密闭性处于良好状态。

1.4.2 开展阶段

第一个试验开展 SAP 复合土质覆盖层土柱模型试验。首先根据南京地区表层土体的初始含水量^[9], 配置 15% SAP 混合土体(砂土和砂土质量 1% 的 SAP 颗粒混合而成的土体), 配置完成的土体放置在密封袋中静置 24 h。待土体静置之后开始压实土体。先在土柱底部压实一层碎石, 主要用于收集下渗的水分。接下来在碎石层上先铺设一层土工布, 再压实 SAP 复合土体。土工布的目的在于防止砂土在试验过程中流入到碎石的孔隙中。SAP 复合土层的厚度为 450 mm, 分 9 层进行压实, 压实的密度控制为其天然密度, 即 1.65 g/cm³。试验过程中, 采用 2.5 kg 的击锤锤击 20 击, 击锤落高为 30.5 cm, 可以达到其天然密度。考虑到现场压实土体以压实功进行控制, 击锤的质量、锤击次数、落高始终保持一致。最后在表面再铺设一层土工布, 用于防止湿化过程中引起的表面侵蚀。将上表面密封, 静置 24 h。土柱静置之后, 在仪器埋设孔的位置埋设相应的张力计和水分传感器, 连接采集装置, 检测传感器状态。底部导管连接采集瓶, 并置于天平上。

土柱试验降雨边界采用极端条件下一次性注水方法, 即不考虑表面径流, 降雨在很短时间内完成, 允许表面形成积水。针对南京地区, 根据《南京市暴雨强度公式(修订)查算表(2014)》^[17]中暴雨强度公式可计算南京百年一遇的极端降雨在持续 24 h 时的降雨强度为 0.108 mm/min, 总降雨量为 155.1 mm。考虑土柱试验装置的底面积 (314 cm²), 试验总注水量为 4870 cm³。以注水时刻为 0 时刻, 记录各传感器的读数变化, 直至传感器读数和下渗量不再变化为止。待试验完成之后, 重新标定所有传感器, 保障试验过程中数据的准确性。

当 SAP 复合土质覆盖层土柱模型试验完成

后,卸除土柱装置中的土体,按表 1 所列开展均质砂土层土柱模型试验。

2 试验结果

2.1 孔隙水压力变化规律

图 5 展示了土柱 5 cm 深处的孔隙水压力随时间变化的发展规律。均质砂土层和均质 SAP 混合土层 5 cm 深处的初始孔隙水压力分别为 -5.9 kPa 和 -22.7 kPa。不同的初始孔隙水压力主要因为 SAP 混合土体比砂土的储水能力强,相同体积含水量条件下 SAP 混合土体的孔隙水压力更小。随着湿化的进行,均质砂土层中湿润锋经过 5 cm 深处所用时间约 20 s,湿润锋经过后孔隙水压力上升至 -0.1 kPa,而均质 SAP 混合土层中湿润锋经过 5 cm 深处所用时间为 0.5 h,湿润锋处的孔隙水压力为 -2.2 kPa。相比于均质砂土层,均质 SAP 混合土层中湿润锋下降至 5 cm 深处所用时间延迟了约 0.5 h,而湿化后孔隙水压力偏低 2.1 kPa。这主要由于 SAP 混合土体的高储水能力降低了湿润锋下渗的速度和孔隙水压力水平。

在湿润锋过后,各覆盖层在 5 cm 深处的孔隙水压力均有所下降。均质砂土层的孔隙水压力下降最快,在 1.3 h 时已下降至 -3.8 kPa,而均质 SAP 混合土层在 2.8 h 下降至 -4.3 kPa。这主要由于 SAP 混合土体的失水量一部分是来自于 SAP 颗粒的失水,导致湿润锋过后的失水速率更慢,而且失水量更小。

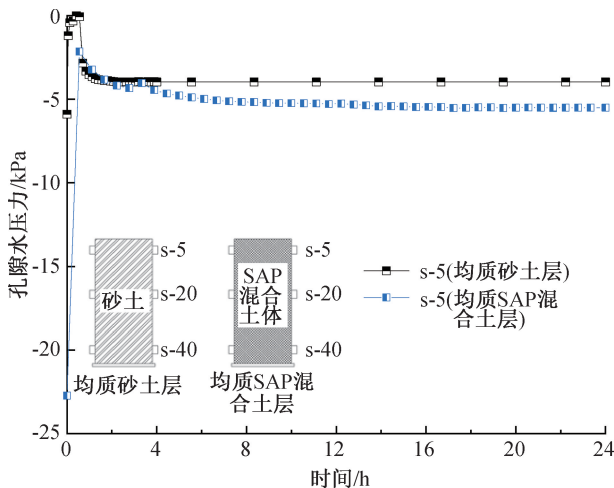


图 5 埋深 5 cm 处孔隙水压力发展规律图

Fig. 5 Development of pore water pressure at the depth of 5 cm

图 6 展示了土柱 20 cm 深处的孔隙水压力随时间变化发展规律。均质砂土层和均质 SAP 混合土层在 20 cm 深处的初始孔隙水压力分别为

-5.2 kPa 和 -22.3 kPa。均质砂土层中湿润锋经过 20 cm 深处所用时间约 8 min,湿润锋经过后孔隙水压力增加至 -0.0 kPa。湿润锋的平均下降速度为 3.2×10^{-4} m/s,比砂土的饱和渗透系数大 1 个数量级,这主要由于下渗过程中非饱和特性增加了其水力梯度。对于均质 SAP 混合土层,20 cm 深处的孔隙水压力在 1.1 h 时开始增加。湿润锋的平均下降速度为 6.9×10^{-5} m/s,也比 SAP 混合土体的饱和渗透系数大 1 个数量级。均质 SAP 混合土层 20 cm 深处的最大孔隙水压力为 -4.2 kPa。

在湿润锋经过后,均质砂土层中 20 cm 深处的孔隙水压力下降最大也最快,在约 1.4 h 时孔隙水压力下降至 -3.0 kPa,之后逐渐收敛。不同于均质砂土层,均质 SAP 混合土层在湿润锋后孔隙水压力降低不明显。均质 SAP 混合土层孔隙水压力下降了 0.6 kPa,这主要由于 20 cm 深处的孔隙水压力接近静态孔隙水压力分布线。这也说明了 SAP 混合土体储水能力强,下渗到 20 cm 深处已无法具有高于自身势能的总水头。

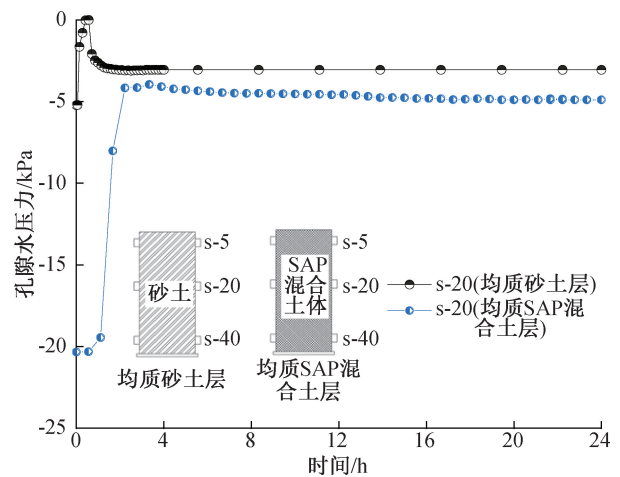


图 6 埋深 20 cm 处孔隙水压力发展规律图

Fig. 6 Development of pore water pressure at the depth of 20 cm

图 7 展示了土柱 40 cm 深处(砂土)的孔隙水压力随时间变化发展规律。对于均质砂土层来说,湿润锋下降至 40 cm 深处需要约 16 min,孔隙水压力上升至 -0.1 kPa。湿润锋的平均下降速度为 4.1×10^{-4} m/s,与 20 cm 深处的下降速度几乎一致。而均质 SAP 混合土层的孔隙水压力在 17 h 时才开始上升,于 20 h 达到最大值 -8.1 kPa。相比于 20 cm 深处的湿润锋下降速度,40 cm 深处的湿润锋下降速度降低了 1 个数量级,这主要由于在下渗过程中,SAP 颗粒会吸取水分,降低覆盖层的孔隙水压力水平,导致渗透系数降低。

湿润锋过后,不同于 5 cm 和 20 cm 深处,40 cm 深处均质砂土层和均质 SAP 混合土层的孔隙水压力没有发生较大的下降。这主要由于其位置接近底部边界,其静态孔隙水压力接近于 0 kPa。

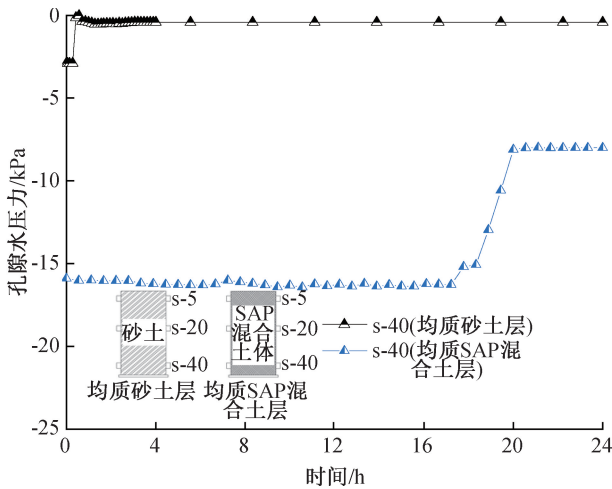


图 7 埋深 40 cm 处孔隙水压力发展规律图

Fig. 7 Development of pore water pressure at the depth of 40 cm

图 8 展示了不同时刻土柱中孔隙水压力剖面图。为了便于比较,以埋深 45 cm 处(砂土层和碎石层分界面)为水位面的静态孔隙水压力分布线也画在图上。在初始时刻,均质砂土层中孔隙水压力深度方向上沿深度近似于直线分布,近似平行于静态孔隙水压力分布线。不同于均质砂土层,均质 SAP 混合土层孔隙水压力随深度增加而线性增加,其斜率近似等于静态孔压分布线。

随着湿化的进行,0.5 h 时均质砂土层孔隙水压力在不同深度均增加至 0 kPa 附近,说明砂土层已基本湿化,接近饱和状态。此时均质 SAP 混合土层中仅深度 5 cm 处孔隙水压力增大,而深度 20 cm 和 40 cm 孔隙水压力无变化,说明水分尚未下渗至 20 cm 深处。

在 24 h 时,均质砂土层中的孔隙水压力有所降低,20、40 cm 深处的孔隙水压力几乎与静态孔隙水压力分布线重合。靠近顶部(5 cm 深处)的孔隙水压力处于静态孔隙水压力分布线右侧,这是由于顶部存在一定的蒸发作用。这说明均质砂土层储水效果不足,大部分水已下渗并排出砂土层。对于均质 SAP 混合土层,不同深度的孔隙水压力比砂土层均小,尤其是 40 cm 深处,这可能由于水分已被上部土体吸收,底部孔隙水压力偏低。

2.2 体积含水量变化规律

图 9 展示了土柱 5 cm 深处的体积含水量随时

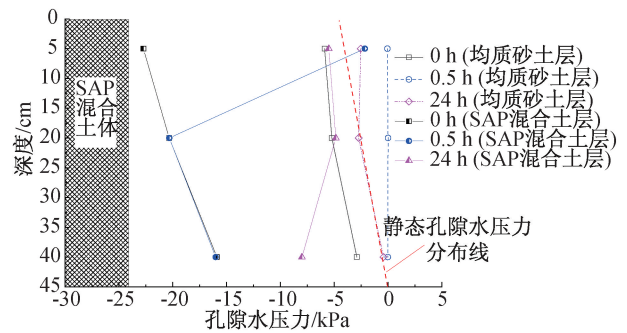


图 8 孔隙水压力剖面图

Fig. 8 Profile of pore water pressure

间的发展规律。均质砂土层和均质 SAP 混合土层的体积含水量均在初始设置的 0.15 左右。在湿化过程中,同孔隙水压力变化规律相似,均质砂土层中埋深 5 cm 的水分传感器在试验初期(约 20 s 时)测量体积含水量迅速上升至 0.36。而均质 SAP 混合土层中 5 cm 深处的体积含水量在 0.5 h 增加至 0.44。

在湿化后,均质砂土层 5 cm 深处体积含水量在 2.5 h 时下降至 0.21,之后收敛。同孔隙水压力变化规律不同,均质 SAP 混合土层在湿化后的体积含水量变化较小。在 0.5 h 至 16 h 期间,体积含水量先增加后降低。均质 SAP 混合土层的最大体积含水量为 0.44。在 24 h 时,体积含水量收敛为 0.4。孔隙水压力和体积含水量的不同变化规律可能由于水力滞回效应和 SAP 颗粒失水速度慢引起的。

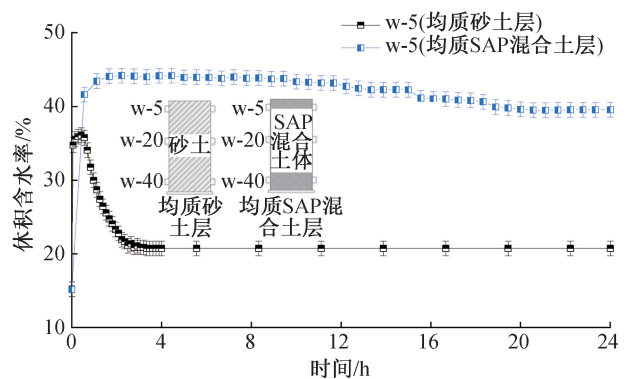


图 9 埋深 5 cm 处体积含水量发展规律图

Fig. 9 Development of volumetric water content at the depth of 5 cm

图 10 展示了土柱 20 cm 深处的体积含水量随时间的发展规律。在湿化过程中,同孔压变化规律相似,均质砂土层 20 cm 深处的体积含水量在 8 min 时上升至 0.36。均质 SAP 混合土层的体积含水量在约 1.1 h 时才开始缓慢上升。不同于孔

隙水压力快速上升,体积含水量上升阶段经历了约 6 h,在 7 h 时收敛于 0.28。这主要由于 SAP 混合土体中水分不仅可以存储在孔隙中,还可以存储在 SAP 颗粒中。SAP 颗粒储水速度慢于孔隙,导致孔隙水压力变化快于体积含水量变化。

在湿化之后,均质砂土层 20 cm 深处的体积含水量在 1 h 至 1.25 h 快速下降至 0.32,之后下降缓慢。在 2.7 h 时,体积含水量收敛于 0.31。对于均质 SAP 混合土层,体积含水量几乎不变化,这主要由于 SAP 混合土体的储水能力高,失水量较小。

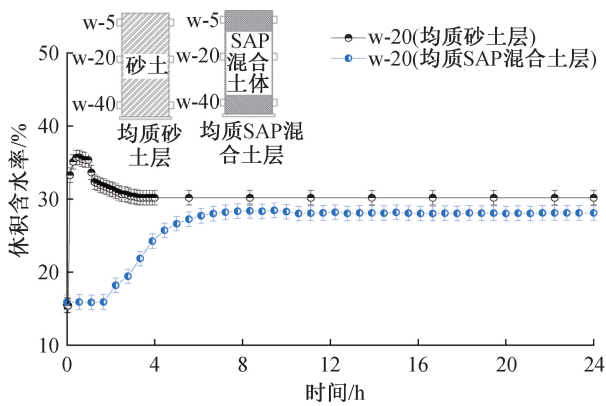


图 10 埋深 20 cm 处体积含水量发展规律图
Fig. 10 Development of volumetric water content at the depth of 20 cm

图 11 展示了土柱 40 cm 深处的体积含水量随时间的发展规律。在湿化过程中,同孔隙水压力变化规律相似,均质砂土层 40 cm 深处的体积含水量在 16 min 左右上升至 0.3。均质 SAP 混合土体的体积含水量在 17 h 时开始上升,在 18.8 h 上升至 0.26,之后不再变化。该变化规律同孔隙水压力变化规律相似,可能由于此时非饱和水平较高,孔隙储水占主导作用。

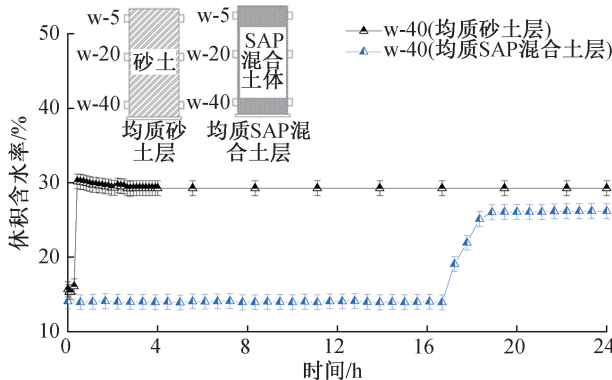


图 11 埋深 40 cm 处体积含水量发展规律图
Fig. 11 Development of volumetric water content at the depth of 40 cm

图 12 展示了不同时刻土柱中体积含水量的剖面图。为了便于比较,将不同覆盖层的饱和体积含水量线也添加在图上。试验初始时,各覆盖层不同深度的体积含水量在 0.15 附近。随着湿化的进行,均质砂土层在 0.5 h 接近饱和体积含水量,尤其是 5 cm 和 20 cm 深处,比饱和体积含水量仅小 0.02。而 40 cm 深处体积含水量相对较小,约为 0.3。在 24 h 时各深度处的体积含水量均有所减小。深度越深,体积含水量减小量越大,这与孔隙水压力分布规律相符。

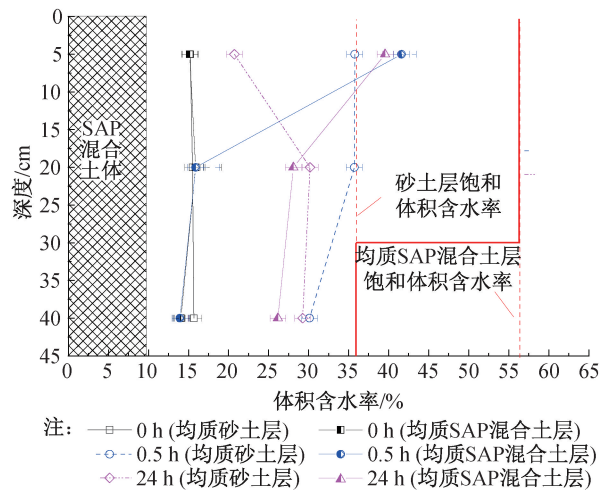


图 12 土柱体积含水量剖面图
Fig. 12 Profile of volumetric water content

对于均质 SAP 混合土层,在湿化过程 0.5 h 时仅影响 5 cm 深处,其体积含水量比饱和体积含水量约小 0.2,这主要由于均质 SAP 混合土层孔隙水压力约为 -2.5 kPa,相对较为干燥。而 20 cm 深处的体积含水量不发生变化。在 24 h 时,与均质砂土层体积含水量分布规律不同,5 cm 深处体积含水量最大,约为 0.4;而 20 cm 和 40 cm 深处的体积含水量分别为 0.28 和 0.26。这主要由于 SAP 混合土体储水能力强,水分优先存储在顶部。

2.3 SAP 复合土质覆盖层防渗效果

不同覆盖层 40 cm 深处水分击穿时间为:均质砂土层在 20 min 左右水分发生击穿,均质 SAP 混合土层的击穿时间延长至 17 h,比均质砂土层长约 16.7 h,击穿时间是均质砂土层的约 50 倍,这说明 SAP 复合土质覆盖层的防渗性能得到极大提升,SAP 复合土体对于水分的下渗产生了较强的阻滞作用。两种覆盖层底部下渗量相差很大,其中均质砂土层的下渗量为 2 510.3 mL,均质 SAP 混合土层下渗量为 12.7 mL,水分下渗量得到了极大

的减小,仅为均质砂土层的 0.5%,证明了将 SAP 掺入土中形成的复合土体具有较强的防渗和储水能力。

3 结论

1)从材料层面来说,SAP 颗粒提升了土体的饱和体积含水量 55%,增加了土水特征曲线中下降段的斜率绝对值 36%。换言之,除了近饱和段,大于进气值阶段的含水量提升也较大。但是 SAP 颗粒对进气值影响较小。

2)失水过程中,SAP 混合土体的孔隙水压力降低较快,而体积含水量降低明显较慢,存在较强的延滞回效应。这主要由于 SAP 混合土体的储水由孔隙和 SAP 颗粒组成,SAP 颗粒的失水速度明显慢于土中孔隙失水,说明 SAP 混合土体的保水性强,减少了雨水下渗量。

3)同常规单层土质覆盖层不同,均质 SAP 混合土层在湿化过程中顶部体积含水量(储水量)最大。随着深度的增加,体积含水量(储水量)随之降低。这主要由于降雨过程中 SAP 颗粒保水性强,顶部 SAP 混合土体优先存储足够量的水,之后水分才渗流至下部。

4)在南京地区百年一遇的极端降雨条件下,SAP 复合土质覆盖层下渗量为 12.7 mL,说明虽发生水分击穿,但渗漏量极小,且相较于普通单一均质砂土层击穿时间得到了极大的迟滞,渗漏量减小了约 200 倍,防渗性能良好。

参考文献:

- [1] 陈云敏,施建勇,朱伟,等. 环境岩土工程研究综述[J]. 土木工程学报,2012,45(4):165-182.
- [2] 薛强,詹良通,胡黎明,等. 环境岩土工程研究进展[J]. 土木工程学报,2020,53(3):80-94.
- [3] HJ1134—2020,生活垃圾焚烧飞灰污染控制技术规范[S].
- [4] 王光进,孔祥云,杨春和,等. 尾矿高坝的边坡稳定性研究[J]. 矿冶,2013,22(1):1-5.
- [5] 黄生文. 非饱和土的滞水试验及其在垃圾填埋场防渗层中的应用[J]. 土木工程学报,2001(3):107-110.
- [6] AUBERTIN M, CIFUENTES E, APITHY S A, et al. Analyses of Water Diversion Along Inclined Covers with Capillary Barrier Effects[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(10): 1146-1164.
- [7] 杨克. 生物炭复合土毛细阻滞层环境岩土工程特性研究[D]. 福州:福州大学,2016.
- [8] CHEN X W, WONG J, CHEN Z T, et al. Effects of Biochar on the Ecological Performance of a Subtropical Landfill[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 963-975.
- [9] 王砚田,华孟,赵小雯,等. 高吸水性树脂对土壤物理性状的影响[J]. 北京农业大学学报,1990(2):181-187.
- [10] 陈锐,刘坚,许颖,等. 多股管线大内径的传感器密封装置及其组装方法:CN103364020A[P]. 2013-10-23.
- [11] 陈锐,刘坚,吴宏伟,等. 一种装配式新型张力计的研制[J]. 岩土力学,2013,34(10):3028-3032.
- [12] 薛雪. 南京城郊不同林分土壤水分时空变异规律及对降雨的响应研究[D]. 南京:南京林业大学,2017.
- [13] GB/T 50145—2007,土的工程分类标准[S].
- [14] 谢伯承,薛绪掌,王纪华,等. 保水剂对土壤持水性状的影响[J]. 水土保持通报,2003(6):44-46.
- [15] SCHINDLER U, DURNER W, UNOLD G, et al. Evaporation Method for Measuring Unsaturated Hydraulic Properties of Soils: Extending the Measurement Range[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(4): 1071-1083.
- [16] 南京市城市管理局. 2014年南京暴雨强度公式(修订)查算表[Z]. 南京:南京市城市管理局,2014:1-2.

(责任编辑 王利君)