

文章编号: 1006-4362(2023)03-0055-07

不同含石量条件下 TBM 渣料降雨入渗特性试验研究

罗璟, 魏玉峰, 裴向军, 金博, 李骞, 董自涛

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059)

摘要: 降雨是大型堆积体边坡失稳的主要诱发因素之一, 研究大型堆积体降雨入渗规律, 有助于揭示其致灾机理, 并指导大型堆积体防灾减灾工作具有重要价值。鉴于此, 本文基于 TBM 渣料独特的针片状形状和定向堆置结构, 开展土柱试验研究, 揭示不同含石量条件下 TBM 渣料降雨入渗规律。研究结果表明: 由于 TBM 渣料定向堆置结构的影响, 在含石量较高条件下, 岩块倾向侧湿润峰运移距离更远, 表现出显著的非均匀入渗特征; 当含石量为 70% 时, 土体结构转变为骨架结构, 岩块间架空, 大孔隙增多, 水流沿孔隙顺向渗流, 渗流速率加快, 并在边壁出现明显聚集现象, 加剧了两侧湿润峰运移的差异; 随着降雨入渗, 基质吸力逐渐降低, 与体积含水率变化规律相反; 而含石量越高, 试样的饱和含水率越低。研究成果将弥补当前对针片状定向排列结构土石混合体降雨入渗规律研究的不足, 为 TBM 弃渣场降雨稳定性分析工作提供理论支撑。

关键词: TBM 渣料; 含石量; 土柱试验; 降雨入渗; 湿润锋

中图分类号: TU411; TV131.61 **文献标识码:** A

EXPERIMENTAL STUDY ON RAINFALL INFILTRATION CHARACTERISTICS OF TBM SLAG UNDER DIFFERENT ROCK BLOCK PROPORTIONS

LUO Jing, WEI Yu-feng, PEI Xiang-jun, JIN Bo, LI Qian, DONG Zi-tao

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Rainfall is one of the main triggering factors for instability of large-scale waste dump. Studying the rainfall infiltration characteristics of large-scale waste dump can help reveal its landslide-triggering mechanisms and provide guidance for disaster prevention and mitigation. Based on the unique needle-like shape and directional stacking structure of TBM excavated material, this paper conducts soil column tests to reveal the rainfall infiltration characteristics of TBM excavated material under different rock block proportions. The results show that due to the influence of the directional stacking structure of TBM waste dump, under conditions of higher rock block proportion, the movement distance of rock blocks toward the wetting front is longer, exhibiting significant non-uniform infiltration characteristics. When the rock block proportion is 70%, the soil structure transitions to a skeleton structure, with increased voids between rock blocks. Water flows along the voids, resulting in accelerated flow rates, and significant accumulation occurs at the sidewalls, intensifying the difference in movement of wetting fronts on both sides. As rainfall

infiltrates, the matric suction gradually decreases, contrary to the variation pattern of volumetric water content. Moreover, higher rock block proportion leads to lower saturated water content in the specimens. The research findings will fill the gap in the study of rainfall infiltration characteristics of needle-like directional arrangements of soil-rock mixtures and provide theoretical support for evaluating the rainfall stability of TBM waste dump.

Key words: TBM excavated material; rock block proportion; soil column test; rainfall infiltration; wetting front

1 前言

据资料显示,我国铁路网规模在2025年预计达到 17.5×10^4 km左右,全国公路在2023年将完成 40×10^4 km建设布局。同时,伴随着“西部大开发”、“一带一路”建设与国防安全战略的相继实施,成兰铁路、绵宜铁路、成万高铁、成宜高速、巴万高速交通建设接连贯通于地质条件极端复杂的西部艰险山区。隧道工程作为山区交通建设的主要结构工程,其线路长度所占比例不断增加,不可避免地出现大量废弃渣土就近堆放形成弃渣场。在地形地质条件复杂的西部山区中,面临可弃场地少、弃渣量大、堆渣高陡等问题。

岩石隧道掘进机(tunnel boring machine,简称TBM)作为具有施工速度快、成洞质量好、人员劳动强度低、作业环境好等诸多优点的隧道掘进技术,从经济、高效、环保、安全等方面明显优于钻爆法^[1],已成为国内外隧道(洞)施工的重要选择。但由于TBM渣料是一种具有典型针片状块石的独特土石混合物,难以作为混凝土骨料或渣土回填等途径进行资源化利用,多以废弃堆置处理^[2]。

近年来,针对弃渣场土石混合物在降雨入渗等问题,国内外学者开展了大量研究,周中等^[3]通过自制土柱试验装置测试了非均质土石混合物在不同含石量、孔隙比及粒径大小条件下的渗透特性;周小军等^[4]运用大型渗透试验装置研究宽级配土石混合物与孔隙率之间的关系;鲁洋等^[5]在对黏质土石混合物进行三轴渗透试验发现在含石量介于0%~70%之间,土石混合体的渗透系数呈现先减小后增大的特点。除了对土石混合物渗透特性的研究之外,研究逐步从不同废弃渣土的基质吸力^[6-7]、入渗湿润峰^[8]、含水率^[9]、孔隙水压力^[10-12]等方面展开研究。

综上所述,针对弃渣堆积体降雨入渗方面已从密实度、颗粒级配、不均匀系数、降雨强度等因素开展大量研究,但缺乏考虑TBM弃渣针片状形状形成的定向堆置结构影响下的降雨入渗规律研究。故本文自制一维垂直入渗模型试验装置,开展土柱试

验研究,分析不同含石量条件下TBM渣料入渗过程中湿润峰运移、体积含水率、基质吸力等动态变化规律,揭示TBM渣料渗透各项异性形成机制,为TBM弃渣场降雨稳定性分析工作提供理论支撑。

2 材料与方法

2.1 试验装置

本次试验装置主要由降雨器、流量控制系统、土柱模型箱、辅助装样装置、数据测定仪器、数据采集仪及计算机构成。

(1) 降雨器

本次试验所选降雨器为可拆卸针管式,呈中空圆柱状,上下分别为水槽和底板,高4 cm,直径30 cm,中间为一层2 mm厚防水硅胶圈,三者由螺栓连接,保证其密封不透气。为确保储水和降雨均匀性,水槽底部针管呈同心圆分布。

(2) 流量控制系统

本文降雨入渗过程为一个持续的长期过程,选用蠕动泵定流量法控制降雨强度,包括:两个橡胶管,容积足够大的储水箱,Baines-ZP100可调速蠕动泵。

(3) 土柱模型箱

土柱模型箱主要由亚克力圆管、亚克力法兰盘、防水橡胶圈、螺纹连接杆、不锈钢底座等部件连接构成,土柱试验装置如图1所示。仪器分为进水段、出水段、试样段。亚克力圆管直径为30 cm、管壁厚为1 cm、高为100 cm;试样段由3段可自由拆卸组装的透明圆筒组成,每节20 cm,每层间由法兰盘连接,试样段一侧设置含水率数据采集孔,另一侧设张力测量孔。

(4) 数据测定

数据测定仪器和软件包括:EC-5型水分传感器、zl6型数据采集仪、RS485型张力计、标尺、智能电子秤、ZENTRA Utility数据处理软件。将水分传感器和张力计分别水平埋置深度为10 cm、30 cm、50 cm处,以测取不同深度试样体积含水率和基质吸力。

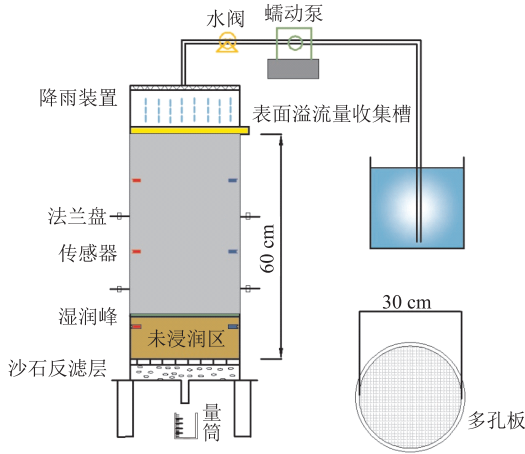


图1 土柱试验装置

2.2 试验设计

(1) 降雨强度和降雨时长

董辉等^[13]研究了不同含石量对渗透系数的影响,其中,当含石量为70%时,渗透系数最大,为 $5.48 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ (19.728 mm/h)。考虑到TBM渣料黏粒含量低,渗透系数较大,降雨强度应尽可能大于饱和渗透系数,因此本文选择降雨强度为75 mm/h,降雨时长约30 h,当底部淋溶液出水量稳定时,停止试验。

(2) 含石量

由于在弃渣倾倒过程中粒径分选特性和不同围岩条件产生的渣料含石量有较大差别。根据罗璟等^[2]研究发现,当含石量不同时,试样将由悬浮结构向骨架结构过渡,将极大影响试样的力学和渗透特性。故为充分揭示含石量对TBM渣料渗透特性的影响,选取10%、30%、50%、70%含石量,通过自制降雨入渗土柱装置,对不同含石量条件下TBM渣料降雨入渗规律进行研究,其中岩块倾角根据现场弃渣场常见坡比设置为 30° ,具体试验设计如表1所示。

表1 试验设计

编号	降雨强度 /mm·h ⁻¹	含石量 /%	干密度 /g·cm ⁻³	岩块倾角 /°
1	75	10	1.72	30
2		30	2.01	
3		50	2.09	
4		70	1.90	

2.3 试验步骤

将现场取得TBM渣料烘干,过筛,按设计压实度分12层装样,每层间进行刮毛。在土柱填装过程中,安装水分传感器和张力计,并静置。通过调整蠕动泵的水流控制器,控制降雨强度,用天平记录水量

变化,测量误差,观察土柱中湿润峰运移情况,并及时收集测量土柱底部排水量。具体试验过程如下:

(1) 试验用土制备:根据《水电水利工程粗粒土试验规程》(DL/T5356-2006)中规定装置内径与试样最大颗粒粒径之比不应小于5,试样高度不应小于试样直径。由于本文选用内径为30 cm、高度为60 cm的空心圆柱体作为试样段,故本试验采用的TBM渣料的最大粒径为60 mm。根据朱国胜等^[14]对宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应的研究,本文对超过60 mm的颗粒采用等量替代法处理。

(2) 土样填筑:试样填筑时,首先使用千斤顶将空心圆柱体倾斜至预定角度,再按5 cm一层均匀铺设并压实,并表面刮毛,继续倒入下一层填装,重复如此操作直至土柱完成。同时注意试验设定的埋设传感器位置,在土柱填装到相应位置时,埋设传感器,传感器放置在土柱中部,平整放置并用细颗粒压实。

(3) 湿润峰测定:选择便于观测的面,从上到下贴上标尺。伴随着降雨入渗,湿润峰的出现,设置10 min为时间间隔使用人工和摄像仪录像读取并记录湿润峰运移位置。

(4) 入渗量计算:在顶面位置上开孔,套入排水管,将排水管接到储水桶内,实现内循环,利用智能电子秤每10 min记录一次数据,水质量的变化即为单位时间的入渗量。

(5) 淋溶液流量计算:记录底部开始出水的时间,每隔30 min记录一次水量,直至排水稳定时停止降雨。

(6) 记录积水点时间、出水点的时间。

3 结果与分析

3.1 湿润峰运移特征

随着降雨的入渗,由于不同含石量条件下TBM渣料的岩块数量差异,其对降雨渗流路径的影响程度各有不同,导致湿润峰呈现出不同的宏观运移特征(图2)。当含石量为10%时,由于岩块较少,其对土体内部结构的改变较弱,湿润峰均匀向下移动,岩块倾角对降雨渗流路径没有明显影响(图2a)。而当含石量为30%、50%和70%时,湿润峰产生不同程度的非均匀入渗特征,岩块倾向侧湿润峰运移距离更远,含石量越大,非均匀入渗特征越显著(图2b、2c、2d)。

通过比较图2中左、右两侧湿润峰随时间的变化情况,进一步定量分析非均匀入渗特征。由图3

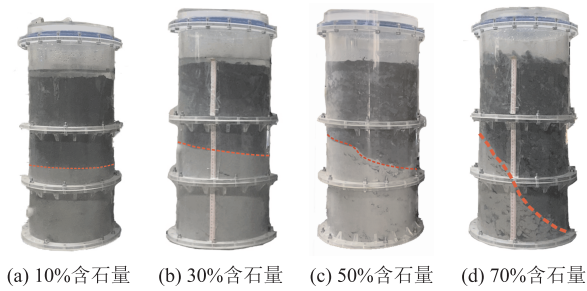


图2 不同含石量条件下湿润峰不均匀入渗特征

可知,当含石量为10%时,曲线基本重合,同样并未表现出非均匀入渗特征(图3a);当含石量为30%时,在累计入渗深度10 cm前,由于该阶段渣料的渗透速率较快,累计入渗深度较小,水流沿岩块倾向方

向积累作用还较小,两侧降雨入渗深度较为均匀;随着入渗时间的增加,曲线出现一定偏移,湿润峰产生非均匀入渗和差异化前进现象,并在入渗深度达35 cm后逐渐保持稳定,左、右两侧湿润峰逐渐以相差10 cm的距离保持相同速率下渗(图3b);当含石量为50%时,由于岩块的顺向渗流作用引起边壁处水流的聚集作用不明显,湿润峰的差异化前进更为明显,甚至出现沿倾向边壁快速下渗的现象(图3c);当含石量为70%时,土体结构转变为由岩块控制的骨架结构,岩块间架空,大孔隙增多,水流沿孔隙顺向渗流,渗流速率加快;同时在岩块倾角影响下,水在边壁出现更为明显聚集现象,加剧了两侧的差异性(图3d)。

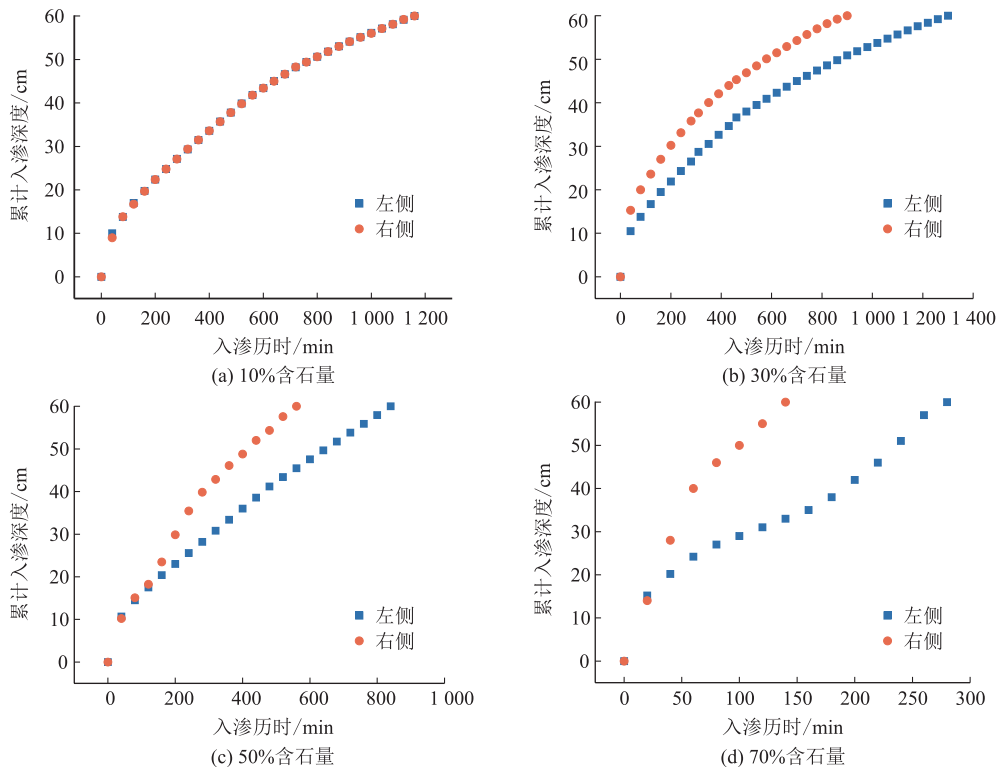


图3 不同含石量条件下左、右侧累计入渗深度随时间变化曲线

通过计算湿润峰入渗深度时间曲线的斜率得到不同含石量条件下湿润峰运移速率变化曲线。如图4所示,从湿润峰出现到被完全浸湿的过程中,不同含石量条件试样的入渗速率在降雨入渗初期速率均较快,其中含石量越高初期速率越快;在0~20 min入渗历时内,含石量10%、30%、50%和70%试样的平均入渗速率分别为0.33 cm/min、0.35 cm/min、0.45 cm/min和0.8 cm/min,含石量为70%时入渗速率较其他试样有较大区别;随着入渗时间的增加,除含石量为70%时在入渗历时达160 min后运移速率有些许波动,其他试样湿润峰运移速率均逐渐

降低,并最终趋于稳定;含石量为10%和30%时的试样在稳定运移阶段的入渗速率较为接近,而50%和70%含石量湿润峰的稳定运移速率依次递增。

3.2 体积含水率变化特征

如图5所示,随着降雨的入渗,试样中不同深度处的体积含水率均逐渐增加并趋于饱和,但不同含石量条件下试样的饱和体积含水率有所区别,表现为含石量越高,饱和含水率越低。而由于TBM渣料为非均质材料,所以降雨入渗后期的体积含水率曲线未完全重合。此外,试样表层在降雨入渗开始后最先响应,但其响应时间有所不同,随着含石量的

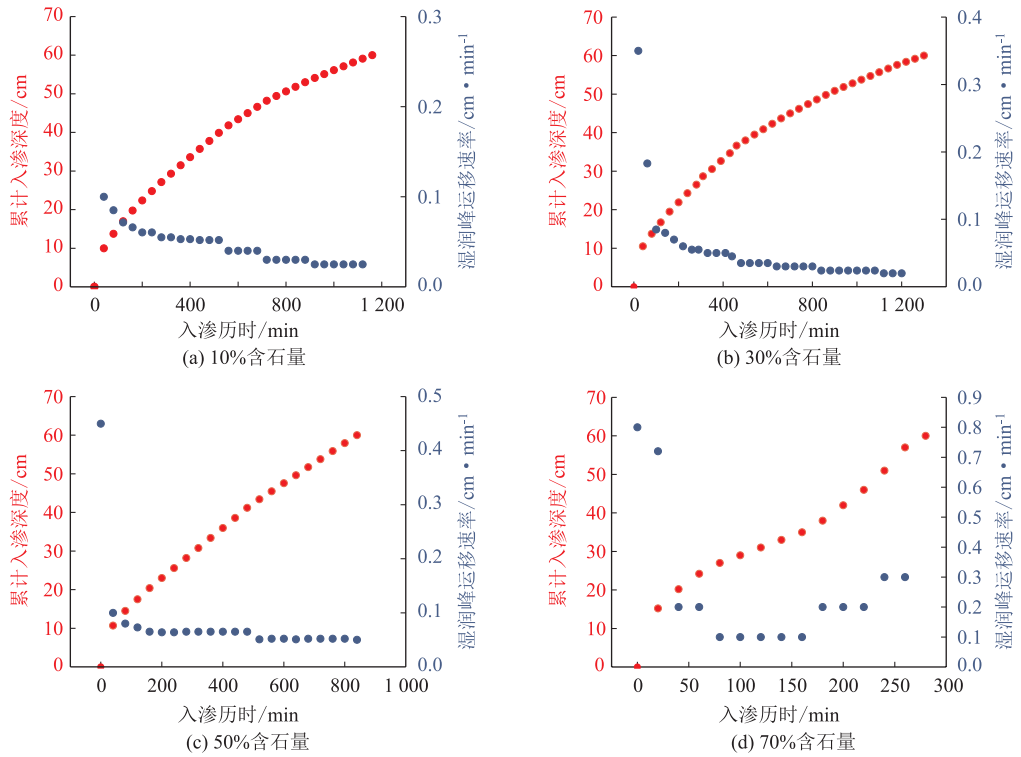


图 4 不同含石量条件下累计入渗深度与湿润峰运移速率关系曲线

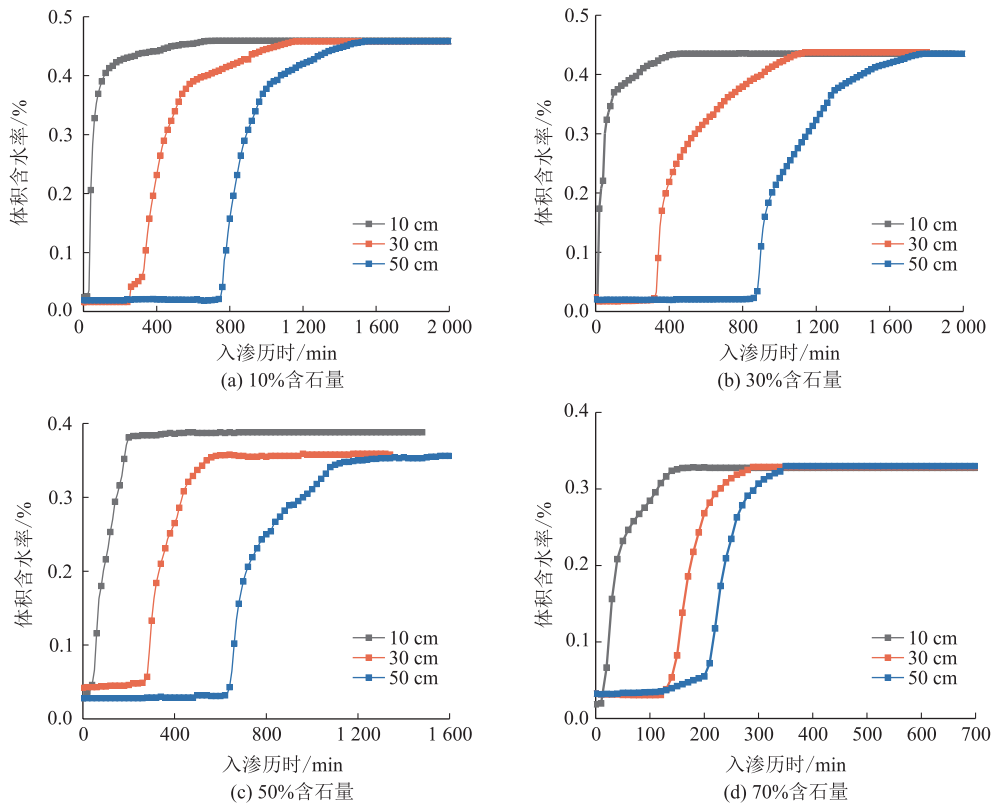


图 5 不同含石量条件下试样不同深度体积含水率随时间变化曲线

增高,顶部传感器开始响应的时间依次为 36 min、22 min、15 min 和 7 min。

由图 6 可知,当含石量为 10%时,随着降雨入

渗时间的增加,体积含水率开始增加的时间随着传感器埋深的增大而依次增加。同时,相邻深度处积含水率开始增加的时间差随深度的增加而增大,

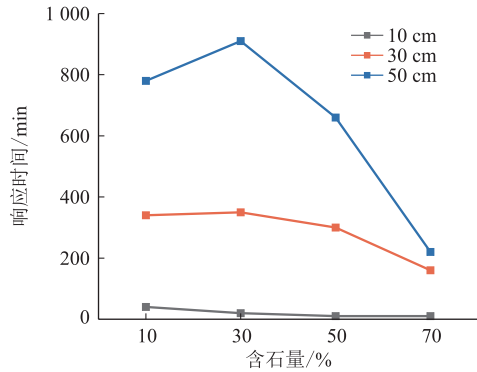


图6 不同含石量条件下试样不同深度体积含水率响应时间变化曲线

10 cm 深度处体积含水率响应的时间为降雨入渗后 20 min 左右,而 30 cm 和 50 cm 深度处两个测点的响应时间分别为 410 min 和 470 min。此外,含石量不同也影响了相同深度的响应时间;在 10 cm 深度处,含石量为 10% 的试样响应时间最晚,但当深度

为 30 cm 和 50 cm 时,含石量为 30% 试样的响应时间最晚。究其缘由,可能由于在试样的表层,降雨入渗和运移主要由细颗粒含量来决定,含石量越高,细颗粒越少,试样表面张力更小,试样浸湿入渗所需的时间更短;而在试样中部和底部,岩块含量和土体结构成为影响降雨入渗的关键因素,在一定范围内提高含石量,内部结构特征转变为骨架密实结构,试样内部孔隙减少,同时岩块对降雨入渗阻滞作用增强,降雨渗流路径变长,降雨入渗速度降低。

3.3 基质吸力变化特征

不同含石量条件下试样不同深度基质吸力随时间变化规律如下图 7 所示,基质吸力传感器从 10 cm、30 cm、50 cm 埋深由浅至深依次响应并逐渐趋于稳定。但与体积含水率相反,随着降雨入渗,基质吸力逐渐降低,直至降低为 0。而由于试样自重的影响,下部土体密实度高于上部,土体颗粒间更为紧密,因此下部基质吸力的初始值略高于上部。

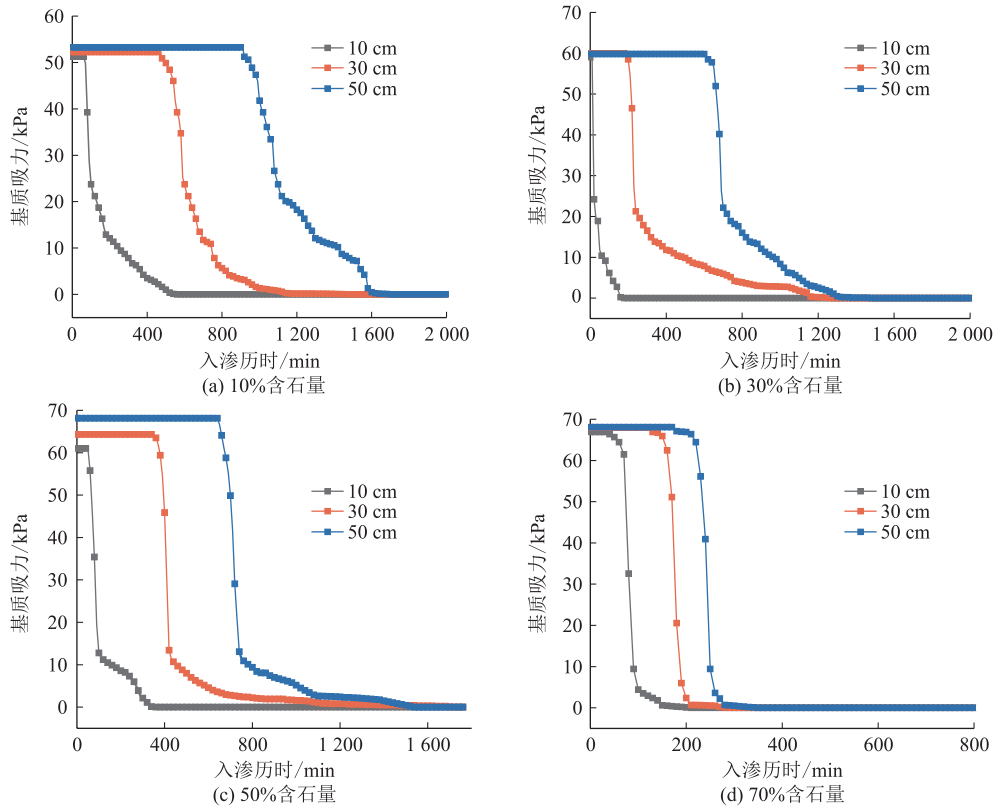


图7 不同含石量条件下试样不同深度基质吸力随时间变化曲线

4 结论

本文自制一维垂直入渗模型试验装置,开展不同含石量条件下 TBM 渣料土柱试验,分析入渗过程中湿润峰运移、体积含水率、基质吸力等动态变化规律,揭示 TBM 渣料渗透各项异性形成机制,主要

得到以下结论:

(1) 当含石量为 10% 时,湿润峰均匀向下移动;而当含石量为 30%、50% 和 70% 时,湿润峰表现出不同程度的非均匀入渗特征,岩块倾向侧湿润峰运移距离更远,且含石量越大,非均匀入渗特征越显著。

(2) 在降雨入渗初期湿润峰运移速度较快,含石量越高初期速度越快,随着入渗时间的增加,含石量10%、30%、50%的试样湿润峰运移速率均逐渐降低,并趋于稳定。

(3) 在试样表层,含石量越高,细颗粒越少,试样表面张力更小,降雨入渗速度越快;而在试样中部和底部,在一定范围内提高含石量,内部结构转变为骨架密实型,试样内部孔隙减少,降雨渗流路径变长,降雨入渗速度降低。

(4) 吸力传感器由浅至深依次响应并逐渐趋于稳定,而同体积含水率变化规律不同,随着降雨入渗,基质吸力逐渐降低,直至为0。

参考文献

- [1] 王婧红,王利英,王彦武. TBM洞挖料用于胶凝砂砾石骨料的可行性研究[J]. 水力发电, 2021, 47(10): 51-55+60.
- [2] 罗璟,董自涛,裴向军,等. 不同含石量条件下TBM渣料剪切特性研究[J]. 工程地质学报, 2023. doi:10.13544/j.cnki.jeg.2022-0697.
- [3] 周中,傅鹤林,刘宝琛,等. 土石混合体渗透性能的正交试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, (9): 1134-1138.
- [4] 周小军,崔鹏,贾世涛,等. 基于正交设计的土体细颗粒迁移积聚水槽实验研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2012, 44(S1): 83-88+103.
- [5] 鲁洋,刘斯宏,张勇敢,等. 黏质土石混合体渗透特性试验及演化机制探讨[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1540-1548.
- [6] Bordoni M, Meisina C, Valentino R, et al. Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: From the field monitoring to a simplified slope stability analysis [J]. Engineering Geology, 2015, 193: 19-37.
- [7] Sasahara K. Prediction of the shear deformation of a sandy model slope generated by rainfall based on the monitoring of the shear strain and the pore pressure in the slope [J]. Engineering Geology, 2017, 224: 75-86.
- [8] Cogan J, Gratchev I. A. study on the effect of rainfall and slope characteristics on landslide initiation by means of flume tests [J]. Landslides, 2019, 16(1): 2369-2379.
- [9] Chang T-J, Chang Y-S, Chang K-H. Modeling Rainfall-Runoff Processes Using Smoothed Particle Hydrodynamics with Mass-Varied Particles [J]. Journal of Hydrology, 2016, 543: 749-758.
- [10] 孙乾征,江兴元,周江,等. 降雨条件下松散堆积体滑坡破坏试验研究[J]. 金属矿山, 2022, (10), 185-190.
- [11] 孟生勇,江兴元,杨义,等. 降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 104-112.
- [12] 左自波,张璐璐,王建华. 降雨触发不同级配堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1319-1327.
- [13] 董辉,罗潇,李智飞. 堆积碎石土细观孔隙空间特征对其渗透特性的定量影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1367-1375.
- [14] 朱国胜,张家发,陈劲松,等. 宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2569-2574.

作者简介: 罗璟(1990—),男,博士,研究员,硕士生导师,主要从事地质灾害风险评价与生态防治方面的研究与教学工作。

E-mail: luoj@cdut.edu.cn