

文章编号:1673-9469(2025)03-0067-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.009

特大暴雨条件下土质边坡入渗特征与微观结构试验研究

苏成¹, 杜功², 王天亮^{1,3*}, 寇晓康^{1,3,4}, 齐向阳¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 国家能源集团朔黄铁路发展有限责任公司 原平分公司, 山西 原平 034100; 3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043; 4. 中核三维地理信息工程技术研究中心, 河北 石家庄 050043)

摘要: 降雨时铁路沿线土质的渗透能力对铁路路基的稳定性和安全性具有直接影响。为探究不同地区及坡度的影响, 运用高精度工业CT微观设备、三维重构模型与现场人工模拟降雨试验, 针对特大暴雨条件下土质边坡的入渗特征及土体孔隙微观性质展开深入分析。结果表明: 在持续性降雨过程中, 5°至50°坡度范围内, 边坡雨水渗透吸水能力呈现缓慢下降直至平稳的趋势; 石河口隧道处孔隙率约为29%, 砂质土粒径较大; 而温塘站地区孔隙率约为19%, 粒径相对较小, 石河口土质渗透能力较强。砂质土粒径越大、坡度越大, 边坡对于雨水的渗透能力越强。从微观角度分析得知, 在同等条件下, 土体内部孔隙与孔喉等效半径越大, 配位数越多, 土体渗透系数越大; 反之, 孔喉长度越长, 土体渗透系数越小。

关键词: 降雨试验; 微观试验; 渗透系数; CT扫描技术; 孔隙结构

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Experimental Study on Infiltration Characteristics and Microstructure of Soil Slopes Under Severe Heavy Rainfall Conditions

SU Cheng¹, DU Gong², WANG Tianliang^{1,3*}, KOU Xiaokang^{1,3,4}, QI Xiangyang¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;
2. Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Yuaning Sub-company, Yuanping, Shanxi 034100, China;
3. Key Laboratory of Road and Railway Engineering Safety Guarantee Jointly Established by the Ministry of Education and the Ministry of Education, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;
4. CNC 3D Geographic Information Engineering Technology Research Center, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: The permeability of the soil along the railway during rainfall directly affects the stability and safety of the railway embankment. To investigate the influence of different regions and slopes, this study combined high-precision industrial CT microscopic equipment, three-dimensional reconstruction models, and on-site artificial rainfall simulation experiments to conduct in-depth analysis of the infiltration characteristics of soil slopes under extreme rain conditions and the microscopic properties of soil pores. The results show that during continuous rainfall, within the range of 5° to 50° slopes, the infiltration and water absorption capacity of the slope gradually decreases and then stabilizes; the porosity at the Shiheshou Tunnel is approximately 29%, with larger sand particles, and the porosity in the Wen Tang Station area is approximately 19%, with relatively smaller particle sizes. The soil at Shiheshou has a stronger permeability. From a microscopic perspective, under the same conditions, the larger the equivalent radius of pores and pore throats in the soil and the greater the coordination number, the larger the soil permeability coefficient; the longer the pore length, the smaller the soil permeability coefficient.

Key words: rainfall test; microscopic test; permeability coefficient; CT scanning technology; pore structure

收稿日期: 2023-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378453); 河北省高层次人才资助项目(C20221025)

第一作者: 苏成(1998—), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 从事特殊土路基与轨道交通灾变控制方向的研究。

* 通信作者: 王天亮(1981—), 男, 河北保定人, 博士, 教授, 从事特殊土路基与轨道交通灾变控制方向的研究。

降雨时铁路沿线土质的渗透特性对铁路运输的稳定性和安全性至关重要。土质疏松、渗透特性不良易导致路基软化、变形甚至塌陷,而强降雨则会引发洪水积聚扩散,威胁铁路运输安全。我国中西部山区铁路常因洪水遭受灾害性破坏^[1-2],如国能朔黄铁路神池至西柏坡段,因地处山区、地形复杂,降雨引发的洪水灾害频发。因此,研究铁路沿线土体降雨渗透特性意义重大,关系到铁路运输安全、环境保护及防洪抗灾。

边坡土体降雨渗水能力受多因素影响,众多学者对此进行了深入研究。在降雨试验方面,郑粉莉等^[3-4]设计了不同降雨强度和汇流速率组合试验,分析了降雨对黑土坡面侵蚀的影响;张瑞雪等^[5]通过人工模拟降雨试验,探究了不同坡度条件下雨强对松散堆积体坡面泥沙输移的影响。室内试验方面,Huang等^[6]研究了透明土壤的渗透性,发现其受流体动力粘度、流体密度、粒径、粒径分布、孔隙率和孔隙形貌的影响。微观试验方面,Wu等^[7]利用X射线显微计算机断层扫描和Avizo软件分析了低渗透砂岩的微观结构;崔翔等^[8-9]通过渗透试验、工业CT扫描和三维重组技术研究了珊瑚砂孔隙微观结构与渗透性的关系;任玉宾等^[10-12]采用常水头渗透试验、扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)与图像处理技术定量描述了砂质土体颗粒形状对渗透性的影响;彭家奕等^[13]对比研究了颗粒级配、土体微观结构分析与渗透试验;李军红^[14]利用工业CT分析了垃圾土的渗透特性;雷炳霄等^[15]通过基本物性试验和SEM扫描与工业CT扫描等微观试验验证了土体高渗透性机理。

综上所述,尽管前人在铁路沿线多坡度降雨渗透特性方面已开展大量研究,但降雨条件下不同孔隙情况对边坡土体渗透能力的影响及其微观机理仍需进一步探究。因此,本文将微观试验与现场人工模拟降雨试验相结合,通过现场人工模拟降雨试验、室内微观试验、基本物性试验三种试验方式深入研究不同地区降雨条件下土质边坡入渗特征与土体孔隙微观性质的内在关联,为确保铁路运输的安全与稳定提供重要依据。

1 试验设计与方法

1.1 现场土样基本物性分析

为保证试样保持天然含水率及孔隙结构,试验材料取自山西省原平市石河口隧道处与河北省平山县温塘站地区自然边坡原状砂质黄土。图1为两地土样粒径级配曲线,通过颗粒分析结果可知,温塘站地区相较于石河口处经过不同尺寸筛网的概率更大,土样平均粒径更小。采用常水头渗透试验、密度与含水率等基本物性试验^[16],对两地土质的密度、含水率、孔隙率等基本物理力学参数进行分析,试验结果如表1所示,其中石河口隧道处土质含水率较高、孔隙较多,土质更为松软。

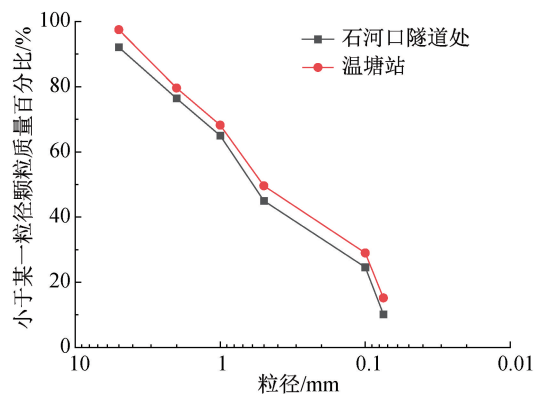


图1 两地土质级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of soil obtained from two locations

1.2 现场人工模拟降雨试验

降雨试验选取石河口隧道处和温塘站附近地区作为试验地点。为研究不同坡度边坡土体的降雨入渗能力,在重塑边坡模型时,需依据各目标坡度设计对应的特定坡高,以构建试验所需的系列坡度条件。各边坡尺寸参数如表2所示。试验所用土体取自自然边坡,为最大限度还原原状土特性,重塑过程中严格调控土体干密度、含水率等核心参数,确保其与原状土物理性质保持一致。填土过程中遵循“分层填土,分层夯实”的原则,根据坡度由小到大的变化逐级采取分层填筑,对每层坡面进行夯实,确保其压实度符合要求,填筑完再

表1 两地土样的基本物理性质参数

Tab. 1 Basic physical property parameters of soil samples obtained from two locations

取样地点	天然密度	天然含水率/%	干密度	孔隙比	孔隙率/%	渗透系数
石河口隧道	1.78	14.294	1.557	0.413	29.210	6.983×10^{-4}
温塘站地区	1.99	12.873	1.763	0.248	19.862	4.577×10^{-4}

表2 各边坡尺寸参数

Tab. 2 Slope dimension parameters						
坡度	5°	15°	30°	40°	45°	50°
底长/m	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
侧宽/m	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26
坡高/m	0.13	0.4	0.87	1.26	1.5	1.79

对坡体进行修整补缝,保持坡面平整,静置 24 h 后进行降雨试验。

试验采用 NLJY-10 型人工模拟降雨系统,该系统均匀度系数大于 88%,误差小于 5%,可保证在有效区域中均匀降雨。试验装置如图 2、图 3 所示。试验系统由全自动降雨控制系统、切割式输水喷头、储水箱、监测系统四部分组成。其中,全自动降雨控制系统可根据需要在 10~240 mm/h 范围内调节设定雨强,对特大暴雨进行模拟,并根据需求设置降雨时长;此外,切割式输水喷头距地高度 4.15 m,有效降雨区域为 4.894 m²,可根据控制系统指令在 0%~90% 的喷头开度范围内进行调节,从而实现雨强的精细化控制;储水箱蓄水量为 1 t,在确保储水池水量充足后,可保证在特大暴雨雨强下持续降雨 80 min 以上;监测系统包括对径流量以及雨强的监测,径流量监测主要采用人



图2 石河口隧道处试验场地
Fig. 2 Test site at Shihekou Tunnel



图3 温塘站地区试验场地
Fig. 3 Test site at the Wentang Station area

工计量的方式,每 2 min 进行地表径流量采集,雨强监测采用全自动降雨控制系统的参数设置与雨量筒计量的方式,每次降雨前将雨量筒放置在有效降雨区域的中心位置,保证测量雨强的平均性,另一端连接控制台,每隔 15 s 进行一次雨强实时反馈,对全自动降雨控制系统参数进行持续修正,保证实时雨强的准确性与时效性。

同时在降雨设备四周铺设塑料膜,起挡风作用,防止野外风力因素导致降雨分布不均匀。为了保证降水过程中雨水不外流,在降雨区域四周设置护坡,防止降水过程中的土壤侧渗。沿坡向在降雨区域地势较低处布设导流装置,用于观测在一定时间内的坡面产流。

1.3 室内微观试验

室内微观试验通过对原状土样进行高精度工业 CT 扫描与模型三维重构,并与基本物性试验所得数据作验证对比,结合现场人工模拟降雨试验,从微观结构角度对两地边坡土体雨水渗透能力进行分析。

为避免结果的偶然性,分别在两个地区取样两次,将取得的原状土制成底部直径 50.46 mm,高 50 mm 的圆柱体试样,操作工业 CT 采用 SQ 扫描模式,扫描完成后以 $(O_x, O_y, O_z) = (1\ 500, 1\ 500, 1\ 700)$ mm 大小的重建体素尺寸对数据进行保存,获得 CT 图像。通过 Avizo 软件进行三维重构,选取中间 1 500×pixel 圆形图像进行分析,处理过程中,通过二值化手段略去了较小的孔隙,经三维重构处理后,切取试样中间部位获取切片成像图与三维立体图,获取样品内部三维微观结构信息的定量表征,分析孔隙和裂缝的形态及展布因素、内部结构变化、孔喉结构等。

2 现场降雨试验结果分析

2.1 两地土体降雨试验中雨水渗透过程分析

降雨过程中的水滴经过自由落体在坡面上,使得位于坡面表层的部分土体被扰动,并径流被冲刷至坡底,此时坡面在降雨水滴的持续拍打侵蚀之下处于不稳定的状态,坡面泥沙以砂砾状或块状向导流通道中滑动。图 4 和图 5 分别是降雨强度为 150 mm/h 的特大暴雨下,温塘站和石河口隧道处在不同坡面下,雨水的渗透能力随时间演变规律。由图 4 和图 5 可知:在相同坡度条件下,温塘站地区与石河口隧道处土体对雨水的渗透

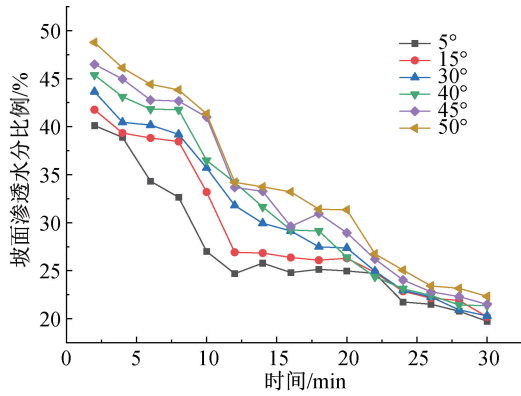


图4 温塘站不同坡度土体对水的渗透能力

Fig. 4 Water permeability of different slope types of soil at Wengtang Station

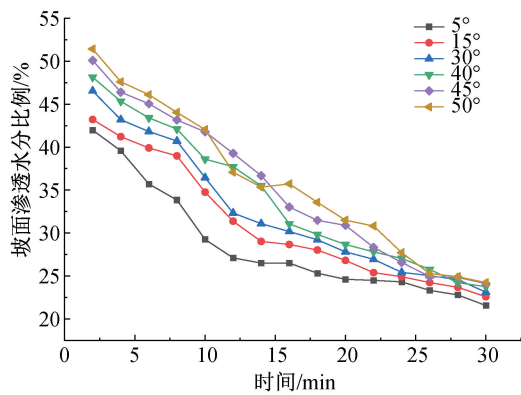


图5 石河口隧道处不同坡度土体对水的渗透能力

Fig. 5 Water permeability capacity of soil with different slopes at the Shihoukou Tunnel

吸收能力,在整个试验过程中均呈现出逐渐减小的趋势。演变过程呈现三个阶段,0~8 min,渗透水分比例较大,坡面吸水能力强,边坡土体表面因干燥且存在裂隙,处于非饱和状态,对水分展现出显著的渗透作用。这一阶段,降雨下渗速率超过雨水汇聚流速,渗透水分比例较大。同时,坡面表层的松散悬沙随汇流进入集水箱,导致初期汇流中悬沙含量较高;随着降雨持续,8~14 min,渗透水分比例迅速减小,坡面吸水能力迅速减弱,此时坡体表面下渗了一定的雨水,坡体表面对于降雨的渗透速率逐渐减小并逐渐趋于稳定,当降雨汇聚度超过渗透速率时,坡面开始出现少量汇流,并携带少量泥沙;14~30 min,渗透水分比例与坡面吸水能力继续减小并趋于稳定,坡体底部引流通道中的汇流也趋于平稳。在同一地区,土体对降雨的下渗吸收速率随坡度增大而提升。这是由于坡度越大,坡高和斜长相应增加,雨滴在坡面滚动的距离延长,与坡面接触时间增长,从而更易于被

土体吸收。因此,坡度越大,土体坡面对降水或径流中水分的下渗能力越强。

2.2 不同坡度下两地降雨试验中雨水渗透能力对比

图6为不同坡度下,两个地区坡面渗透水分比例随时间的演变规律。由图6可知,在5°至50°坡度范围内的任一坡度下,石河口隧道处的坡面渗透水分比例均大于温塘站地区,这主要是由于石河口隧道处的土质较为疏松,土体自然裂隙较多,孔隙率较大,为水分的渗透提供了良好的通道,因此石河口隧道处坡面的渗透性更好。总体来看,在降雨第2 min时,土体对于水分的渗透能力较强且此时两地各自下渗水分比例差距最大,当持续至第6 min之后,两地对于水分的渗透能力逐渐趋于波动平稳。由表1基本物性试验可知,两地土质存在孔隙特征差异,石河口隧道处砂质土壤孔隙率较大,孔隙率越大的边坡对于雨水的渗透吸收能力越强,且坡度越大渗透吸收能力越强。此外,两地土壤类型均为砂质土,由图1颗粒级配关系可知,石河口隧道处粒径较大,结合降雨试验,砂质土粒径越大,边坡对于雨水的渗透吸收能力越强。

3 微观试验结果分析

3.1 微观结构对两地边坡土体雨水渗透能力影响定性分析

在图像分割时,针对不同类型的试样采用顶帽分割法,分割效果较好,实现了图像精确分割。图7为石河口隧道处与温塘站地区四个原状土试样切片成像,切片均选取位于试样中间位置,图中蓝色部分代表小孔隙,白色闭环部分代表原状土中的石块,其余棕色部分代表土体。根据四个试样切片图像可直观地看出石河口试样1和石河口试样2的原状土内部的孔隙较多,大多数呈联通状,少部分呈散点式分布,土质较为松软,孔隙率较大;温塘站试样1和温塘站试样2的原状土内部的孔隙较少,呈散点式分布,土质较为密实,孔隙率较小。

运用 Avizo 重构模拟软件,分别得出四个原状土试样的孔隙网络模型,通过三维立体的方式,直观地观察四个试样的组成架构。二维切片成像图在展示土体内部连通性及孔隙分布时具有一定的局限性,截面上虽有孔隙分布,但恰好有完整孔隙连接通道的概率较小。而三维网络模型可对原状土试样内部孔隙、孔喉的有效参数进行直

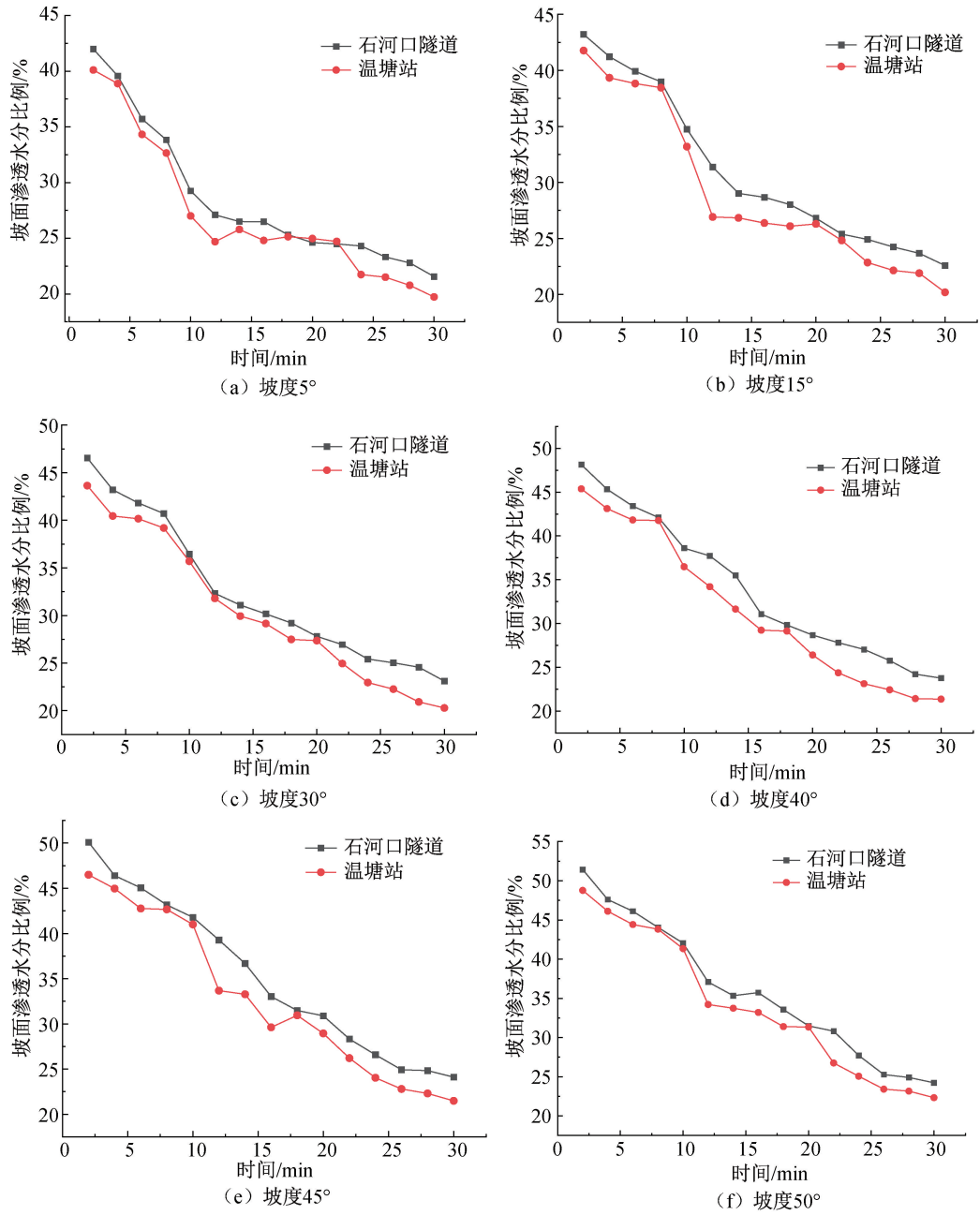
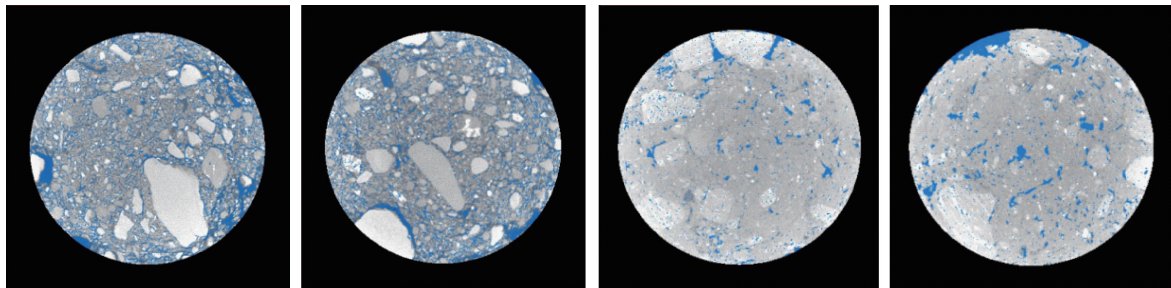


图 6 不同坡度下两地坡面渗透水分比例

Fig. 6 Proportion of water infiltration on slopes of two locations at different slopes



(a) 石河口试样1

(b) 石河口试样2

(c) 温塘站试样1

(d) 温塘站试样2

图 7 原状土试样切片成像

Fig. 7 Image acquisition of cut sections of undisturbed soil samples

接观察,更便于完整展示原状土试样内部每个孔隙、孔喉的交错情况,在数据分析软件中可计算出部分孔隙参数,对比分析各个原状土试样内部的连通性。

孔隙网络模型是由孔隙和孔喉组成,孔隙的分布表现出颗粒填充的特点,孔喉构型则是一种网络模型。孔隙网络模型是描述多孔介质内部孔隙结构的模型,将孔隙空间简化为由孔隙体和相互连通的毛细管构成的孔隙网络,通过孔隙结构特征研究多孔介质中的流体流动。表3为四个原状土试样的三维重构模型,用彩色球体代表孔隙,孔隙等效半径在图中表现为球体的半径;用彩色圆柱体代表孔喉,多呈细长杆状,孔喉的等效直径在图中表现为圆柱体的直径,孔喉等效长度在图中表现为圆柱体的长度;灰色介质为原状土试样中的土体结构。

由表3可得,石河口试样1与石河口试样2土体孔隙网络较为密集,孔喉纵横交错,孔隙网络模型中球体较多,表明这两个试样中的孔隙较多,密密麻麻呈蜂窝状分布,且每个球体上杆型分支较为密集,即孔隙与孔隙之间连通孔喉的个数较多,平均配位数较大,配位数的分布规律与土体中孔

隙连通度基本一致。石河口试样1和石河口试样2中联通结网与球体分布较多,表明石河口隧道处土样的孔隙连通性较好,从而表明该地区土体的渗透性较好,与图6中不同地区的雨水渗透比例演变规律相吻合。

温塘站试样1与温塘站试样2土体孔隙网络较为松散,孔喉虽有重叠错落,但相比于石河口试样1和石河口试样2分布较少,孔隙网络模型中球体较少,每个球体上杆型分支较为稀疏,即孔隙与孔隙之间连通孔喉的个数较少,平均配位数较小,孔喉较长且细,配位数的分布规律与土体中孔隙连通度基本一致,表明温塘站试样1和温塘站试样2中的孔隙连通性较差,导致该土体的渗透性较差,进一步解释了温塘站边坡雨水渗透性差的原因。

3.2 微观结构对两地边坡土体雨水渗透能力影响定量分析

在使用软件处理过程中,通过进行切片处理与三维重组处理,提取孔隙网络模型的参数有:联通孔隙数、平均孔隙长度、孔隙等效半径、平均配位数、平均孔喉等效半径、平均孔喉长度、平均

表3 原状土样三维重构模型

Tab. 3 3D reconstruction model of undisturbed soil samples

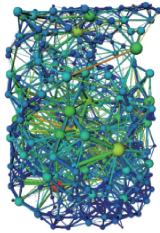
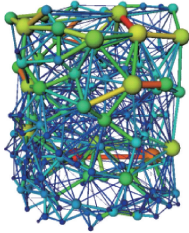
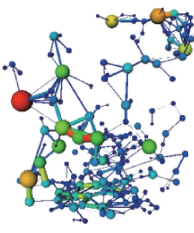
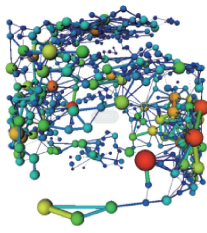
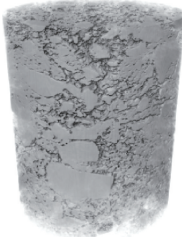
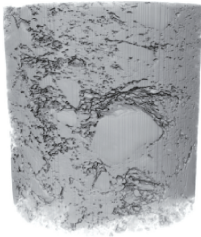
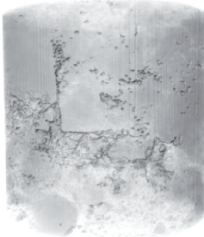
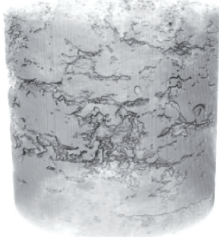
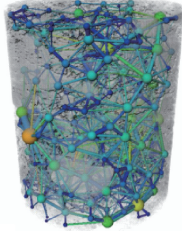
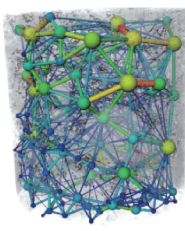
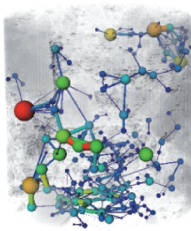
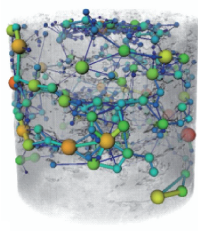
模型	石河口试样1	石河口试样2	温塘站试样1	温塘站试样2
土体孔隙网络				
土体结构				
土体整体成像				

表4 原状土样微观孔隙分析

Tab. 4 Microscopic pore analysis of undisturbed soil samples

试样	联通孔隙数/个	孔隙平均长度/ μm	孔隙平均等效半径/ μm	平均配位数	孔喉平均等效半径/ μm	孔喉平均长度/ μm	平均面孔隙率	平均渗透系数
石河口试样 1	426	3.285	1.692	9.798	0.465	7.516	0.288	7.163×10^{-4}
石河口试样 2	194	4.334	2.167	10.763	0.674	8.086	0.306	
温塘站试样 1	224	2.097	1.048	3.739	0.308	4.089	0.2128	4.218×10^{-4}
温塘站试样 2	498	2.125	1.062	3.843	0.332	4.727	0.1941	

面孔隙率、孔隙率等。根据表4对联通孔隙进行分析可得,试样的孔隙率大小不是由单一联通孔隙数决定,而是由孔隙、孔喉、配位数等多种因素共同作用。

由表4得知,微观试验所得平均渗透系数与前文表1中由常水头渗透试验得出的渗透系数相近,表明了微观试验的可靠性。石河口试样1和2的平均渗透系数大于温塘站试样1和2,表明石河口隧道处土质渗透性较好,这与原状土样孔隙结构中各个参数相吻合。单从联通孔隙数来看,四种试样之间并无明显规律,石河口试样1和试样2的平均孔隙长度、孔隙平均等效半径较为相近,且均比温塘站试样1和2要大;石河口试样1和2的每个孔隙的平均配位数在10附近,表明每个联通孔隙上平均与十个孔喉相连通,孔隙间连通性更好;由平均孔喉半径与平均孔喉长度可知石河口隧道处的两个试样相比,两试样孔喉平均长度相近但石河口试样1的孔喉等效半径较小,表明石河口试样2的孔喉形状较为粗壮,更有利于水分的渗透;虽然石河口试样1的联通孔隙数较多,但是石河口试样2的孔隙平均等效半径、孔喉平均等效半径较大,故导致试样2平均面孔隙率较大,内部连通性较强。而温塘站试样1和2之间,同样的联通孔隙数相差较大,但是最终呈现出的平均面孔隙率相近,是由于在孔隙平均等效半径、配位数、孔隙的平均长度、孔喉平均等效半径等参数相近的情况下,孔喉平均长度较长,由前文孔喉长度与渗透能力呈反比例关系可知,温塘站试样2的平均面孔隙率较小。

整体来看,石河口试样1和试样2的平均面孔隙率均大于温塘站试样1和试样2,两组试样相差较大的参数有孔隙平均等效半径、平均配位数、平均孔喉等效半径、平均孔隙长度等,故而石河口试样1和2呈现出的平均面孔隙率较大,表明了石河口隧道处试样孔隙率较大且原状土体内部连通性较好,为石河口隧道处的高渗透性提供了必要条件,因此该地在降雨试验中土体对于降雨的渗透

能力较强,与该地区土质室内物性试验与常水头渗透试验中得出的大孔隙比与高渗透性相符合。

4 结论

1)在降雨过程中,5°至50°坡度范围内,两坡体雨水渗透吸水能力均呈现缓慢下降直至平稳的趋势。石河口隧道处孔隙率在29%左右,砂质土粒径较大,温塘站地区孔隙率在19%左右,粒径与石河口隧道处相比较小,石河口土质渗透能力较强。砂质土粒径越大、坡度越大,边坡对于雨水的渗透能力越强。

2)由微观分析可知,土体孔隙结构中联通孔隙数、平均孔隙长度、孔隙等效半径、配位数、孔喉等效半径、平均孔喉长度等都是影响土体平均孔隙率与渗透能力的重要因素。在同等条件下,土体内部孔隙与孔喉等效半径越大,配位数越多,土体渗透系数越大;孔喉长度越长,土体渗透系数越小。

3)通过工业CT与相关模拟软件结合,可对大孔隙砂质黄土重构孔隙网络三维模型,且试样本身孔隙率与三维模型处理得到的孔隙率一致,处理所得孔隙网络模型简洁直观,可从微观角度上深入研究孔隙、孔喉、配位数等孔隙结构与渗透能力的相关性,表明了微观试验的准确性与细致性。

参考文献:

- [1] 李江山,李滨,殷跃平,等.强降雨诱发作用下岩溶山体滑坡机制研究——以关岭滑坡为例[J].岩石力学与工程学报,2023,42(6):1497-1507.
- [2] 王斌,李洁涛,王佳俊,等.强降雨诱发堆积体滑坡模型试验研究[J].岩土力学,2023,44(S1):234-248.
- [3] 郑粉莉.坡面降雨侵蚀和径流侵蚀研究[J].水土保持通报,1998(6):20-24.
- [4] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等.降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J].生态学报,2017,37(24):8207-8215.
- [5] 张瑞雪,彭清娥,赵瑜琪,等.降雨和汇流条件下坡面泥沙输移特征对比[J].灌溉排水学报,2021,40

- (S1): 5-10.
- [6] HUANG B, GUO C, TANG Y, et al. Experimental study on the permeability characteristic of fused quartz sand and mixed oil as a transparent soil [J]. *Water*, 2019, 11(12): 2514.
- [7] WU J S, XING M, YIN S X, et al. Analysis of micro-structure and low permeability with 3D digital rock modeling [J]. *Geofluids*, 2022, 2022.
- [8] 崔翔, 姚劲松, 杨吉红, 等. 三维孔隙微观性质对珊瑚砂介质渗透性影响研究 [J]. *土工基础*, 2023, 37(5): 782-786+796.
- [9] 崔翔, 朱长歧, 胡明鉴, 等. 珊瑚砂渗透性的微观机理研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(12): 2336-2341.
- [10] 任玉宾, 王胤, 杨庆, 等. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 491-497.
- [11] 任玉宾, 王胤, 杨庆, 等. 典型深海软黏土全流动循环软化特性与微观结构探究 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(8): 1562-1568.
- [12] 任玉宾, 杨庆, 王胤, 等. 典型深海软黏土触变特性与微观结构探究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(5): 1295-1302.
- [13] 彭家奕, 张家发, 沈振中, 等. 颗粒形状对粗粒土孔隙特征和渗透性的影响 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(2): 592-600.
- [14] 李军红. 细观结构变异引起的垃圾土渗透性及强度劣化研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [15] 雷炳霄, 李俊, 吴佳伟, 等. 济南富水裂隙黏性土的渗透特性试验研究 [J]. *路基工程*, 2023(3): 68-72.
- [16] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2010 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- (责任编辑 周雪梅)

(上接第 66 页)

- [12] 全国水泥标准化技术委员会. 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉: GB/T 18046—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 钢渣混合料路面基层施工技术规程: YB/T 4184—2009 [S]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [14] 全国钢标准化技术委员会. 道路用钢渣: GB/T 25824—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [15] 中华人民共和国工业和信息化部. 水泥混凝土路面用钢渣砂应用技术规程: YB/T 4329—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [19] 张大翰, 李萌, 王新悦, 等. D-最优混料设计优化肉苁蓉速溶咖啡加工工艺 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(23): 9233-9241.
- [20] 黄志福, 赵毅, 梁乃兴, 等. 基于数字图像处理技术的沥青混合料摊铺均匀性实时监测评价方法 [J]. *公路交通科技*, 2017, 34(4): 8-15+79.
- [21] 李万庆, 续玉倩, 孟文清, 等. 数字近景摄影测量在钢桁架节点试验中的应用 [J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(1): 42-47.
- (责任编辑 周雪梅)