

陕西泾阳某黄土滑坡土的分散性试验研究

郑文杰^{1,2}, 蒋鑫^{1,2}, 吕玉蒙^{1,2}, 张励^{1,2}, 吴艾芳^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 分散性土一直为岩土工程中的重要研究问题之一, 在工程上容易引起管涌、路基失稳等破坏。目前判别土的分散性试验主要有双比重计试验、针孔试验、碎块试验、孔隙水可溶性阳离子试验和交换性钠离子百分比试验等 5 种, 但判别标准和结果各不相同, 无法明确判定土的分散性。有学者提出通过赋予各试验方法所得结果不同权重的方法进行综合判别, 该方法得到了广泛应用和推广。作为公认的多种鉴别方法中最为直接可靠的针孔试验, 由其得出的结果比较有说服力。因此, 需要进行一系列的针孔试验, 判断陕西泾阳某滑坡土的分散性, 以期提供治理滑坡灾害方面的建议。

关键词: 分散性土; 针孔试验; 判别准则; 滑坡灾害

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)03-0317-08

Experimental study on dispersion of loess landslide soil in Jingyang, Shaanxi Province

ZHENG Wenjie^{1,2}, JIANG Xin^{1,2}, LÜ Yumeng^{1,2}, ZHANG Li^{1,2}, WU Aifang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering (XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: Dispersive soil has always been one of the significant research problems, which is easy to cause piping and roadbed instability and other damage in engineering. At present, there are five kinds of dispersion tests for discriminating soil, such as double hydrometer test, pinhole test, crumb test, pore water salts test, and exchangeable sodium percent test; however, the dispersity of soil cannot be clearly determined due to the different criteria and results. Some scholars have proposed a method of comprehensive discrimination by assigning different weights to the results obtained by each test method, which has been widely used and promoted. The pinhole test, as the most direct and reliable test among the recognized identification methods, is quite convincing. Therefore, it is necessary to carry out a series of pinhole tests to determine the dispersion of a landslide soil in Jingyang, Shaanxi Province, in order to provide suggestions for the treatment of landslide disasters.

Key words: dispersive soil; pinhole test; criterion; landslide disaster

20 世纪 50 年代, 澳大利亚首次发现分散性土的存在, 因其在土的作用下会出现土体颗粒分散的显著特点而被称为分散性土^[1-2]。分散性土会引起溃坝、路基失稳、管涌等工程危害, 如美国俄克拉何马与密西西比两州的土坝^[3]、西班牙的圣胡安水库大坝^[4]、黑龙江引嫩工程^[5]、海南省三亚市的岭落水库^[6]、山西上马水库土坝^[7]都因使用了分散性土作为筑坝土料, 从而发生洞穴、管涌及溃坝的危害。因此对分散性土的研究成为近些年岩土工程领域的重要课题之一。

鉴别分散性土的等级是研究这种特殊土的重要前提。目前, 由于我国对分散性土的研究起步

较晚, 尚未进行统一的试验判别标准, 用国内常规的土工试验并不能区分非分散性土和分散性土, 因此鉴别土的分散等级主要根据美国材料与试验协会 (ASTM) 制定的试验规程和美国分散性土协会提出的方法来鉴定, 即双比重计试验^[8], 针孔试验^[9]和碎块试验^[10], 交换性钠离子百分比试验^[11]和孔隙水可溶性阳离子试验^[12]。众多学者利用这五种判别方法进行分散性土的研究, 提出许多宝贵的意见和结论。DJOKOVIC^[13]考虑了土壤压实对分散特性的影响, 用针孔法在不同压实度下获得的分散性试验表明压实度对其分散性等级没有显著影响。SIVAPULLAIAH 等^[14]通过使用

收稿日期: 2021-03-08

修改稿日期: 2022-07-05

基金项目: 省级大学生创新创业训练计划项目 (S202010703179)

第一作者: 郑文杰 (1980—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要进行特殊土力学与工程防灾研究。E-mail: w-c.cheng@xauat.edu.cn

双比重计、收缩龄期极限和无侧限压缩试验后得出后一种方法更准确,通常可用于评估土壤的分散性. PREMKUMAR 等^[15]通过针孔试验和碎屑试验测定添加褐煤粉煤灰(BFA)土壤样品的分散特性发现 BFA 是一种可行的粘合剂,可用于稳定分散性土壤提高其抗侵蚀性. 魏迎奇等^[16]通过对试验资料的综合分析得出黏土样的分散性与其物理性指标无关,但与土的 pH 值有明显关系. 樊恒辉等^[17]鉴定了室内四种试验研究方法并得出若四种试验方法鉴定结果出现相互矛盾时应当从土的物理化学性质、矿物成分作进一步的分析. 樊恒辉等^[18]根据通过判别分散性土的各种试验方法的特点赋予其不同的权重计算出土样的分散性、过渡性、非分散性的权重来综合判别土的分散性. 岳婵等^[19]通过五项分散性鉴别试验以及标准吸湿含水率和 pH 值的测定得到具有含钠蒙脱石的含量高同时满足土壤发生分散的物质基础和环境条件时土壤才会发生分散. 樊恒辉等^[20]应用五种试验方法对大坝心墙土样进行了多种方案的分散性试验及长期渗流条件下的渗透变形试验和盐分运移试验得出的结果表明土样中钠离子和钙镁离子含量多寡和相对含量对粘土分散性具有重要的作用.

众多学者为确定土的分散等级做了大量的工作,其中针孔试验方法能直观地模拟土体在渗透水流的作用下产生的冲蚀现象,定量的判别土样的分散性,具有一定的工程现实意义,被认为是较为可靠的鉴别方法^[21]. 因此,基于以上研究,本文以陕西泾阳某地区土样为研究对象,利用针孔试验和综合判别标准确定土的分散性.

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本研究所用土样采样地点为陕西省泾阳县某滑坡处,图 1 为试验用土的粒径分布曲线,表 1 为土的物理性质. 根据 ASTM 标准,土壤分类符号为 CL.

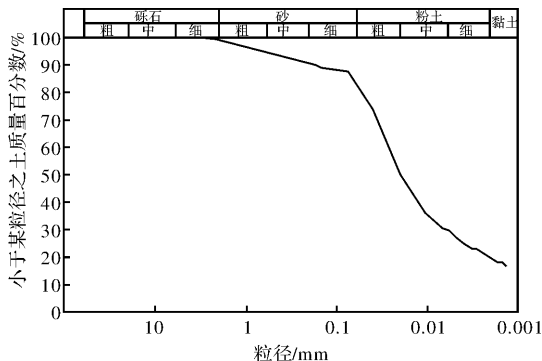


图 1 试验用土的粒径分布曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of test loess

表 1 土的物理性质

Tab. 1 Physical properties of loess

比重	液限/%	塑限/%	天然含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水量/%
2.661	24.38	14.21	17.25	1.745	13.54

1.2 针孔试验

1.2.1 方法原理

针孔试验是在特制的试验装置中,在呈圆柱形的试样中心穿一直径为 1.0 mm 轴向细孔,然后用水进行渗流试验,在不同的水头下观察针孔受流水冲蚀的情况,记录水流流量、颜色、孔径尺寸,据此判断土样的分散性.

1.2.2 试样制备和仪器设备

本试验采用风干后的扰动土,土样通过 2 mm 筛,去掉粗砂或砾石颗粒,所用含水率为最优含水率 13.54 %,所用密度采用最大干密度的 96 %,试样通过压样仪分五层压实,试样最终高度为 38.1 mm,直径 33 mm.

针孔试验装置图如图 2 所示,包括:有机玻璃管、拉杆、螺丝、前后面板、砾石、金属网片、进水口、出水口、测压管、密封圈、塑料软管、孔径 1.5 mm,高度 12.7 mm 的锥体、水箱、5 ml, 10 ml, 25 ml, 50 ml, 100 ml 的量筒、直径 1 mm,长约 50~70 mm 的硬钢丝.

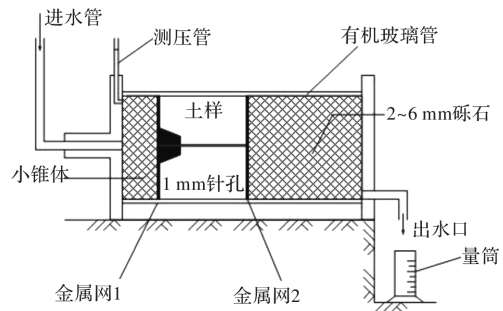


图 2 针孔试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pinhole test device

1.2.3 试验操作步骤及注意事项

首先用手指压力把小锥体推进试样顶部. 用硬钢丝通过小锥体穿孔,穿透后旋转硬钢丝 4~5 次拔掉,使针孔干净、畅通.

在针孔试验圆筒内的试样上部下部放置金属网和砾石块,装配仪器,连接进水管. 在 50 mm 水头下,水流透过针孔,每级水头时间间隔 5~10 min. 用秒表和量筒连续测量流量并记录时间,通过侧视和顶视观察量筒中水的颜色,将水的颜色分为很浑浊,浑浊,较混浊,轻微浑浊,肉眼可见,清澈和完全清澈 7 个等级.

试验结束后,拆卸仪器,取出土样,切开试样检查针孔大小,将针孔大小与使用的硬钢丝比较,近似测定孔洞尺寸,并对侵蚀后试样的针孔、量筒中水的颜色拍照记录。

对于坚硬的原状土样,由于插入小锥体的缘故可能破坏试样,可去除小锥体。本研究所用试样为扰动土,插入小锥体对试样未产生影响。试样经过风干后采用最优含水率来配制。由于流量在试验过程中的测定存在较大难度,鉴定标准有时可以不用考虑流量的变化,而仅仅考虑水流颜

色和针孔的变化。试验结束后如果发现针孔呈喇叭口形,建议对针孔的出口处进行保护处理,防止产生误判。为接近场地的实际情况,本试验采用自来水进行试验,而非采用蒸馏水。

1.3 分散性土判别方法

在第二节所述试验方法的基础上,需要运用针孔试验的判别法则来对土样的分散性质进行严谨明晰的判断,图3所示的判别流程图是在笔者对判别法则进行了少许简化后的结果。

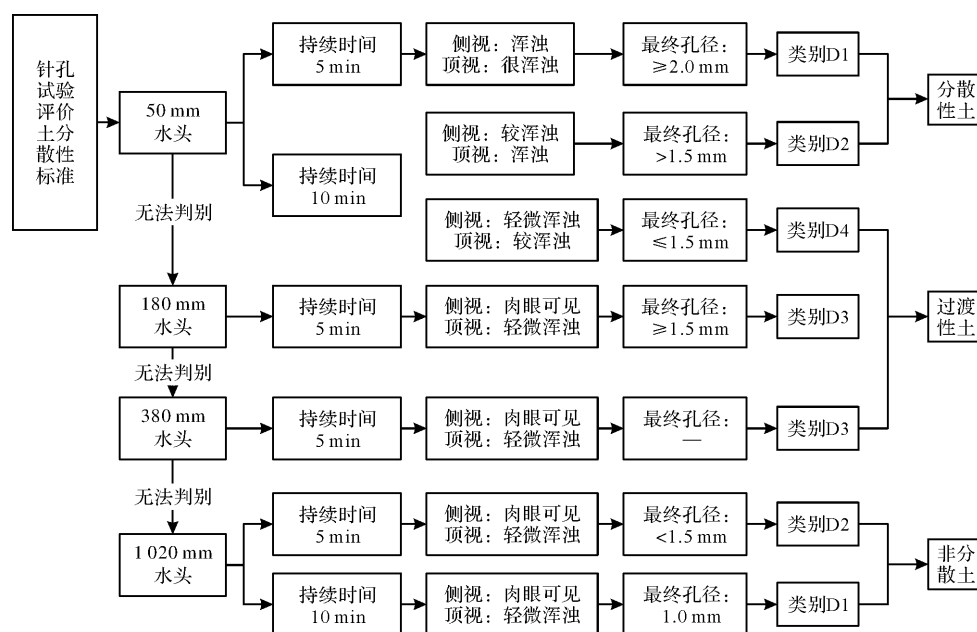


图3 针孔试验判别标准流程图

Fig. 3 Flow chart of pinhole test criterion

(1) 在 50 mm 水头下。

(a)从 50 mm 水头开始试验(没有水流时, 停止试验, 重新穿孔);

(b)分散性土与非分散性土的主要差异以 50 mm 水头下的试验成果来判定。在 50 mm 水头下试验进行 5 min。在 5 min 末, 如果水流很浑浊, 流量不断地增加, 达到了约 1.0~1.4 mL/s, 停止试验;

(c)拆开仪器, 取出并切开土样, 测量针孔的直径变化与硬钢丝比较。若 5 min 后孔径大于等于原孔径两倍, 列入强分散性土类(D1)。如果流量和针孔孔径矛盾, 则重新试验;

(d)如果 50 mm 水头下的水流浑浊, 过了 5 min, 侧视浑浊颜色明显且流量没有超过 1.0 mL/s, 继续试验 5 min;

(e)如果 10 min 末, 水流依然浑浊, 停止试验, 测量针孔直径的变化。如果流量约 1.0~1.4 mL/s, 试验后针孔直径大于原来的 1.5 倍, 就列入分散土(D2);

(f)如果 10 min 末, 水流轻微浑浊, 停止试验, 测量针孔直径的变化。如果流量约 0.8~1.0

mL/s, 试验后针孔直径小于等于原来的 1.5 倍, 就列入过渡性土(ND4);

(g)如果 10 min 末, 水流清亮或稍微有浑浊, 而且流量约 0.4~0.8 mL/s, 将水头提高至 180 mm, 进行下一阶段试验。

(2) 在 180 mm 水头下。

(a)180 mm 水头下, 水流颜色明显较为浑浊而且流量增加速度较快增至 1.4~2.7 mL/s, 停止试验, 测量针孔。如果试验后针孔大于等于原来针孔的 1.5 倍, 则列入过渡性土(ND3);

(b)在 180 mm 水头下, 5 min 后如果水流依然很清澈, 或有肉眼可见的土粒, 流量约 0.8~1.4 mL/s, 则将提高水头到 380 mm, 继续进行试验。

(3) 在 380 mm 水头下。

(a)在 380 mm 水头下, 5 min 后如果水流逐渐变浑浊, 或流量增加到约 1.8~3.2 mL/s, 则列入

过渡性土(ND3);

(b)在 380 mm 水头下, 5 min 后如果水流是很清澈的, 流量约 1.0~1.8 mL/s, 则提高水头到 1 020 mm.

(4) 在 1 020 mm 水头下.

(a)在 1 020 mm 水头下, 5 min 后如果水流明显有些颜色或流量超过 3.0 mL/s, 列入非分散性土(ND2), 否则列入非分散性土(ND1);

(b)非分散土(ND1)在 1 020 mm 水头下, 流量一般小于 3.0 mL/s, 试验结束时针孔直径不发生较大变化.

2 针孔试验结果

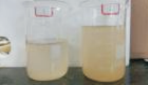








本研究对 50 mm 水头下的三组重复试验进行结果分析, 拍摄实物土样在固定水头作用固定时

间的侵蚀破坏形态, 对侵蚀后孔径尺寸进行观测, 记录烧杯所呈溶液分别在侧视、顶视下的浑浊程度, 最终进行分散性判别, 如表 2 所示.

50 mm 水头下的三组试验开始 5 min 后, 水流量分别为 175 mL, 180 mL 和 130 mL, 流量分别为 0.6 mL/s、0.6 mL/s、0.4 mL/s, 远未达到 1.0~1.4 mL/s, 因此进行下一个 5 min. 在 10 min 末, 土样 1 流量达到 0.9 mL/s, 水流颜色轻微浑浊; 土样 2 流量达到 0.4 mL/s, 水流颜色浑浊; 土样 3 流量达到 0.01 mL/s, 是因为土样发生了孔道堵塞, 但此时水流颜色变得浑浊, 因此停止试验. 切开试样后测量孔径, 土样 1、2、3 的孔径分别为 3~4 mm、4 mm、1.5~2 mm, 大于原来孔径的 1.5 倍, 依照第 2 节的判别标准, 将本试验用土列为分散土(D2 等级).

表 2 针孔试验结果记录表

Tab. 2 Record sheet of pinhole test results

土样	水头 /mm	时间 /min		水流量 积/mL		流量 /(mL · s ⁻¹)		水色	出水孔	侵蚀孔道	侵蚀孔径 /mm	分散 等级
1	50	5	5	175	265	0.6	0.9				3~4 (>1.5 倍)	分散性 (D2)
2	50	5	5	180	130	0.6	0.4				4 (>1.5 倍)	分散性 (D2)
3	50	5	5	130	3	0.4	0.01				1.5~2 (>1.5 倍)	分散性 (D2)

3 分析与讨论

从前一章节的试验结果可知, 本试验用土为分散土(D2 等级). 但单一的试验判别难免缺乏说

服力, 因此为得到更严谨的结论, 笔者采用了相同的土样进行孔隙水可溶性阳离子试验, 判别结果如表 3 所示.

表 3 孔隙水可溶性阳离子判别结果

Tab. 3 Discrimination results of soluble cations in pore water

Na ⁺ 浓度 /(mmol·L ⁻¹)	K ⁺ 浓度 /(mmol·L ⁻¹)	Ca ²⁺ 浓度 /(mmol·L ⁻¹)	Mg ²⁺ 浓度 /(mmol·L ⁻¹)	阳离子总量 /(mmol·L ⁻¹)	钠百分比 PS /%
26.957	0.0295	1.825	2.208	31.019	86.9

判别结果依下列公式计算而得.

$$TDS = C_{Na^+} + C_{K^+} + C_{\frac{1}{2}Ca^{2+}} + C_{\frac{1}{2}Mg^{2+}} \quad (1)$$

$$PS = C_{Na^+} / TDS \quad (2)$$

式中: C_{Na^+} 为钠离子含量, mmol/L; C_{K^+} 为钾离子含量, mmol/L; $C_{\frac{1}{2}Ca^{2+}}$ 为孔隙水中钙离子含量, $\frac{1}{2}$ mmol/L; $C_{\frac{1}{2}Mg^{2+}}$ 为孔隙水中镁离子含量, $\frac{1}{2}$

mmol/L; TDS 为孔隙水中阳离子含量, mmol/L; PS 为钠百分比, %.

以 TDS 为横坐标, PS 为纵坐标在半对数坐标图中绘制 PS 与 TDS 关系曲线图.

如图 4 所示, 若土样落在 A 区, 为分散性土; 落在 B 区, 为非分散性土; 落在 C 区, 为过渡性土. 因此可以判别本试验用土为分散性土.

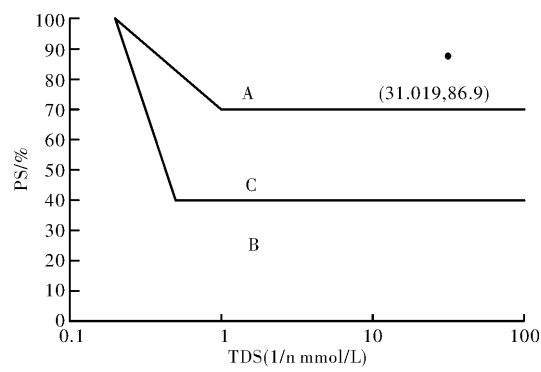


图 4 土的分散性与 TDS、PS 的关系

Fig. 4 Relationship between the soil dispersion and TDS, PS

为了使针孔试验判别更具说服力, 笔者参照了其他学者的试验结果, 采用物理性质相近的土样进行比对. 若干试验结果列于表 4.

结合表格归纳可得针孔试验具有代表性, 其工程现实意义十分重要, 前人所完成的大部分试验, 无论土样差异如何, 选用单一的判别方法或综合判别(已有较多不同的试验方法所得结果不完全相符的现象^[26]), 都以针孔试验结果为最重要指标之一.

表 4 其他试验结果

Tab. 4 Other test results

土的类别	物理性质	试验方法	试验结果
低液限黏土(CL)	比重: 2.70, 2.71	针孔试验(权重 40 %)、碎块试验(权重 20 %)等的综合判别方法	针孔试验判别及综合判别 1 #, 2 # 组土样为过渡性土 ^[22]
	塑限: 17.1 %, 17.6 %		
	液限: 28.4 %, 29.6 %		
	最优含水率: 17.2 %		
	最大干密度: 1.72 g/cm ³		
低液限黏土(CL)	比重: 2.72, 2.71	针孔试验、碎块试验、双比重计试验等的综合判别方法	针孔试验判别及综合判别 1 #, 2 # 组土样为分散性土 ^[23]
	塑限: 17.6 %, 15.4 %		
	液限: 29.6 %, 28.4 %		
	最优含水率: 13.5 %, 15.5 %		
	最大干密度: 1.81, 1.72 (g/cm ³)		
低液限黏土(CL)	比重: 2.71 或 2.72	针孔试验、碎块试验、双比重计试验等的综合判别方法	针孔试验判别及综合判别 W4、W6、W11 为分散性土, W9、W10、W17 为过渡性土 ^[24]
	塑限: 12.6 %~14.4 %		
	液限: 26.5 %~29.0 %		
	最优含水率: 13.8 %~15.2 %		
	最大干密度: 1.75~1.78 g/cm ³		
低液限黏土(CL)	比重: 2.70~2.72	针孔试验、碎块试验、双比重计试验等的综合判别方法	针孔试验判别土样 8 为过渡性土, 其余 8 组为分散性土; 综合判别 1, 3, 6, 8 组为过渡性土 ^[25]
	塑限: 14.3 %~17.3 %		
	液限: 25.0 %~30.1 %		
	最优含水率: 13.6 %~16.5 %		
	最大干密度: 1.73~1.84 g/cm ³		

表格所摘取的试验所用土样物理性质与本试验接近, 具有对照意义. 上述试验判别为过渡性土或非分散性的土样分组中, 钠离子的析出浓度及其在可溶性阳离子中的占比低, 而本试验土样的钠离子占比高, 接近 87%, 在此笔者认为土中

钠离子含量与土体分散性有密切联系. 以往一些学者在土体组成影响分散机制上做了大量工作, 提出了一系列解释. 一类观点是: 土体中含有一定的特定矿物成分, 且少胶结物质同时具有较强碱性^[27]. 笔者认为, 这类分散机制解释仍有待

完善之处,表格所摘取的试验亦有矿物成分分析,但未发现某种特定矿物对于分散性的决定性意义,相反,矿物成分相差大的土样却表现出相近的分散性。同时,判别为分散性土样的大多具有较强碱性,根据孔隙水阳离子试验分析结果,土体呈碱性与高钠土联系紧密^[28],因而,钠离子对分散机制的影响本质值得进一步探究。也有学者从物理性质及化学性质两个不同的方面来分析分散机制,并认为化学性质的影响在分散性判别中发挥了更强的作用,物理性质则是在非分散性中更为明显,两者作用程度相近时结果为过渡性土,提供了一个更为全面的研究视角。与这类解释相似的是:土体的某些物理组成提供了有利于土体在水中发生分散的,具有一定pH值的液体环境,并且含有大量可交换钠离子等因素^[29],进而加速分散过程^[30];矿物组成对分散性的影响不能以含量多少来线性考虑,土体所处液体环境具备一定的pH值与高 Na^+ 为加剧分散性的本质要素^[31]。

本试验对所用土样进行了物理性质分析,且在50 mm水头下进行了多组针孔试验及孔隙水可溶性阳离子成分分析,即得到明晰的判别结果,对照物理性质、钠离子含量相近的其他试验,结果相差不大,同时我们也发现有些试验分组被判别为过渡性或非分散性土。在一定意义上可以说钠离子占比高、土体呈强碱性是更为重要的影响因素,物理性质不能作为决定性的影响因素,高浓度钠离子的存在及有利于离子交换的矿物组成、化学环境,使得土体颗粒间的排斥势能显著增大。于是,加速了与水体的接触和反应,水体的物理剥蚀及化学侵蚀也得以更快更充分地进行^[32]。采取这类解释较为契合本试验结果。本试验仍然具有局限性,针孔试验虽然有效模拟了一定条件下的工程实际情况,但却难以反映最为主要的影响因素,分散机制需要对照大量的相似或对比试验来加以探究。

4 结论与展望

以陕西泾阳某地区黄土为例进行一系列的针孔试验,判断其分散性,得出以下主要结论:

(1) 本次针孔试验选取具有代表性50 mm水头下的三组重复试验结果进行分析,由于流量在试验过程中难以测量准确,所以,在鉴定标准中有时可以不用考虑流量的变化,本次试验仅对水流颜色和针孔侵蚀破坏形态进行分析。三组试验均呈现侧视较浑浊,顶视浑浊程度深,最终孔径

为原来的1.5倍,由此得出该土样为D2等级的分散性土;

(2) 孔隙水可溶性阳离子试验表明土体在水中分散时,可交换钠离子含量高,达到86.9%,在TDS-PS分区图中划归为分散性土。可能的原因为钠离子含量高时土体颗粒间电子层增厚,排斥力大于粘聚力等吸引力;

(3) 针孔试验具有分散性影响因素不凸显,分散机制需要大量对照组加以解释等局限性,应结合更多物理化学成分分析或结合碎块试验、双比重计试验等进行综合分析较宜。孔隙水阳离子试验具有试验结果明确,但同时在分散性土与过渡性土间的区别力度不够,需同其他类型试验相佐证;

(4) 本试验中土样分散机制的最重要因素为高浓度可交换钠离子及强碱性环境,矿物组成等其他物理性质不能作为决定性因素,但其创造了合适的化学环境以加快土体在水中的分散过程。

参考文献 References

- [1] 钱家欢. 分散性土作为坝料的一些问题[J]. 岩土工程学报, 1981(1):94-100.
QIAN Jiahuan. Problems on dispersive soil as dam materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981(1):94-100.
- [2] CHARLES H M. The use of chemical additives to control the erosive behavior of dispersed clays[C]// Engineering Aspects of Soil Erosion, Dispersive Clays and Loess. New York: ASCE, 1987:1-16.
- [3] 王观平, 张来文, 阎仰中, 等. 分散性黏土与水利工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
WANG Guanping, ZHANG Laiwen, YAN Yangzhong, et al. Dispersive clay and hydraulic engineering[M]. Beijing: China Hydraulic Power Press, 1999.
- [4] GUTIÉRREZ F, DESIR G, GUTIÉRREZ M. Causes of the catastrophic failure of an earth dam built on gypsiferous alluvium and dispersive clays[J]. Environmental Geology, 2003, 43(7):842-851.
- [5] 王观平. 黑龙江省南部引嫩工程分散性粘土的研究与处理措施[J]. 水利水电技术, 1992(3):18-22.
WANG Guanping. Research and treatment measures of dispersed clay in southern Heilongjiang Nen water diversion project[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 1992(3):18-22.
- [6] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2006.
LIU Jie. Seepage control of earth-rock dams theoretical

- cal basis, engineering experiences and lessons [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006.
- [7] 岳宝蓉, 金耀华. 山西上马水库土坝裂缝原因与防治措施[J]. 防渗技术, 1998, 4(3): 1-14.
YUE Baorong, JIN Yaohua. Causes and prevention measures of cracks in earth dam of Shangma reservoir in Shanxi Province[J]. Technique of Seepage Prevention, 1998, 4(3): 1-14.
- [8] ASTM. Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer; ASTM D4221-99[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2005: 1-4.
- [9] ASTM. Standard test method for identification and classification of dispersive clay soil by the pinhole test; ASTM D4647-93[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2000: 1-6.
- [10] ASTM. Standard test methods for determining dispersive characteristics of clay soil by the crumb test; ASTM D6572-00[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2000: 1-4.
- [11] THOMAS M P. Identification of dispersive clay soils by a physical test[D]. Stillwater: Oklahoma State University, 1974.
- [12] REZA B. An experimental study on Sherard's chemical criterion with regard to the role of extraction water content on identifying dispersivity of soils[J]. Civil Engineering, 2000(1): 13-19.
- [13] DJOKOVIĆ K, ČAKI L, ŠUŠIĆ N, et al. Methods for assessment and identification of dispersive soils[J]. ce/papers, 2018(2): 205-210.
- [14] UMESH T S, SIVAPULLAIAH P V, DINESH S V. Characterization of dispersive soils[J]. Materials Sciences and Applications, 2011, 2(6): 629-633.
- [15] PREMKUMAR S. Effect of brown coal fly ash on dispersive clayey soils[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2017, 170(4): 231-244.
- [16] 魏迎奇, 温彦锋, 蔡红, 等. 分散性黏土鉴定试验的可靠性分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007(3): 186-190, 195.
WEI Yingqi, WEN Yanfeng, CAI Hong, et al. Reliability analysis of identification test of dispersive clay[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007(3): 186-190, 195.
- [17] 樊恒辉, 李鹏, 巨娟丽, 等. 论分散性黏土与鉴定方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2004(2): 34-38, 59.
FAN Henghui, LI Peng, JU Juanli, et al. Discussion on dispersive soil and methods of identification[J]. Journal of water Resources and Architectural Engineering, 2004(2): 34-38, 59.
- [18] 樊恒辉, 赵高文, 路立娜, 等. 分散性土的综合判别准则与针孔试验方法的改进[J]. 水力发电学报, 2013(1): 250-255, 264.
FAN Henghui, ZHAO Gaowen, LU Lina, et al. Comprehensive criterion of dispersive soil and improvement of pinhole test[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013(1): 250-255, 264.
- [19] 岳婵, 唐红, 姚海林, 等. 分散性土分类与鉴别的室内试验研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(7): 149-153, 159.
YUE Chan, TANG Hong, YAO Hailin, et al. Laboratory Test of Classification and Identification for Dispersive Clay[J]. Yellow River, 2021, 43(7): 149-153, 159.
- [20] 樊恒辉, 吴普特, 李鹏, 等. 分散性粘土判别试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1310-1310.
FAN Henghui, WU Pute, LI Peng, et al. Study on identification of dispersive clay soils Chinese[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1310-1310.
- [21] 李兴国, 许仲生. 分散性土的试验鉴别和改良[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(1): 62-66.
LI Xingguo, XU Zhongsheng. Test identification and improvement of dispersive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(1): 62-66.
- [22] 陈华, 樊恒辉, 路立娜, 等. 黏性土的分散性判别及机理分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(2): 149-155.
CHEN Hua, FAN Henghui, LU Lina, et al. Dispersivity identification of clayey soil and its mechanism[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(2): 149-155.
- [23] 李振, 周俊. 防渗土样的分散性与渗透变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(S1): 3316-3321.
LI Zhen, ZHOU Jun. Experimental study on dispersibility and filtration erosion of soil core wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(S1): 3316-3321.
- [24] 樊恒辉, 孔令伟, 郭敏霞, 等. 文家沟水库筑坝土料分散性和抗渗性能试验[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 458-463.
FAN Henghui, KONG Lingwei, GUO Minxia, et al. Dispersivity and impermeability of dam soil in Wenjiagou Reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 458-463.
- [25] 樊恒辉, 孔令伟, 李洪良, 等. 马家树水库大坝防渗土料分散性判别和改性试验[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 193-198, 222.
FAN Henghui, KONG Lingwei, LI Hongliang, et al. Study of dispersive identification and treatment with

- lime of dam soil in Majiushu Reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1):193-198, 222.
- [26] 邓亲云, 张健. 分散土的判别及应用于心墙堆石坝的工程措施[J]. 水利技术监督, 2000, 8(6): 23-26.
- DENG Qinyun, ZHANG Jian. Discrimination of dispersed soil and engineering measures applied to core rockfill dam[J]. Water Resources Technical Supervision, 2000, 8(6): 23-26.
- [27] LEONG E C, RAHARDJO H. A review on soil-water characteristic curve equations[J]. Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering, 123(9):1106-1117.
- [28] HOLMGREN G GS, FLANAGAN C P. Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test[C]//ASTM STP 623. Chicago. USA: American Society for Testing and Material, 1977:218-239.
- [29] 樊恒辉, 李洪良, 赵高文. 黏性土的物理化学及矿物学性质与分散机理[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1740-1745.
- FAN Henghui, LI Hongliang, ZHAO Gaowen. Relation among dispersive mechanism, physical-chemical and mineral properties of clayey soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 (9): 1740-1745.
- [30] 高明霞, 李鹏, 王国栋, 等. 南坪水库筑坝土料分散机理及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1303-1308.
- GAO Mingxia, LI Peng, WANG Guodong, et al. Mechanism and reason of dispersivity of dam soil in Nanping Reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8):1303-1308.
- [31] 赵高文, 樊恒辉, 陈华, 等. 影响黏性土分散性的化学因素及机理分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6):202-206.
- ZHAO Gaowen, FAN Henghui, CHEN Hua, et al. Influence of chemical factors on dispersivity of clayey soil and the dispersive mechanism [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2013, 41(6): 202-206.
- [32] 刘华, 张硕成, 鲁洁, 等. 酸碱污染对 Q₃ 黄土湿陷表征影响的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4):525-531.
- LIU Hua, ZHANG Shuocheng, LU Jie, et al. Laboratory tests on the collapsibility characteristics of Q₃ contaminated loess by acid and alkali solutions[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4):525-531.

(编辑 吴海西 沈 波)