

陕北筑坝黄土的分散性判别及其改性研究

任冠洲^{1,3}, 李亚军², 张蕊², 徐铁铮², 杜飞², 樊恒辉^{1,3}

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710000;

3. 西北农林科技大学 岩土工程研究所/特殊岩土博物馆, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 分散土遇水易分散流失, 极易对水渠、大坝等水利工程造成冲沟、管涌等危害。为避免陕北地区土石坝因此造成溃坝, 采用野外调查分析、经验公式判别、泥球试验和针孔试验, 对陕北7座水库10组筑坝黄土的分散性进行了判别, 通过土样和库水的物理化学性质分析, 阐明了分散土的影响因素及分散机理, 同时研究了石灰对分散土的改性作用。分析结果发现, 10组筑坝土样中2组属于物理-化学复合性分散土、4组属于低凝聚性土(物理性分散土)、2组属于过渡土、2组属于非分散土。物理-化学复合性分散土在库水的抑制作用下分散性会减弱, 表现为低凝聚性土的特征。土体的分散性随着石灰剂量的增加和养护龄期的延长, 逐渐降低并完全消除。研究表明, 陕北筑坝黄土由于黏粒含量低、钠离子含量高和酸碱度呈碱性, 因此具有一定的物理或化学分散性, 导致抗水蚀性较差。库水对土的分散性具有较强的抑制作用, 石灰对低黏粒含量的分散土有很好的改性效果。

关键词: 黄土; 分散性; 判别方法; 分散机理; 改性

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)04—0104—09

Dispersity Discrimination and Modification of Dam Loess in Northern Shaanxi

REN Guanzhou^{1,3}, LI Yajun², ZHANG Rui², XU Tiezheng², DU Fei², FAN Henghui^{1,3}

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering/Museum of Problematic Rock and Soil, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Dispersive soil is easy to disperse and lose when encountering water, which may cause gully, piping and other hazards to water conservancy projects such as canals and dams. In order to avoid dam failure caused by earth rock dams in northern Shaanxi, the dispersity of 10 groups of dammed loess in 7 reservoirs in northern Shaanxi is distinguished by field investigation and analysis, empirical formula discrimination, mud ball test and pinhole test. Through the analysis of physical and chemical properties of soil samples and reservoir water, the influencing factors and dispersive mechanism of dispersive soil are clarified, and the modification effect of lime on dispersive soil is analyzed. The results show that two of the 10 groups of dam soil samples belong to physical-chemical composite dispersive soil, four groups are low cohesion soil (physical dispersive soil), two groups are transitional soil, and two groups are non-dispersive soil. Under the action of reservoir water, the dispersity of physical-chemical composite dispersive soil will be weakened, showing the characteristics of low cohesion soil. With the increase of lime dosage and the extension of curing age, the dispersity of soil gradually decreases, or even completely eliminates. The research shows that the dam loess in northern Shaanxi has certain physical or chemical dispersibility due to its low clay content, high sodium ion content and alkaline pH, resulting in poor water erosion resistance. The reservoir water has strong inhibitory effect on the dispersity of soil, and lime has a good modification effect on the Dispersive soil with low clay content.

Keywords: loess; dispersity; discrimination method; dispersive mechanism; modification

收稿日期: 2022-05-03

修稿日期: 2022-05-27

基金项目: 陕西省水利科技计划项目(2021slkj-19); 国家自然科学基金(52079116); 青年科学基金项目(52108343)

作者简介: 任冠洲(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为特殊性土的工程性质及改良技术研究。E-mail: a13183273882@163.com

通讯作者: 樊恒辉(1973—), 男, 研究员, 主要从事特殊性土的工程性质及改良技术研究工作。E-mail: yt07@nwsuaf.edu.cn

陕北黄土高原是国家能源化工重要基地,但由于水资源的分布不均,缺水成为制约国民经济发展的主要因素。因此,发展水利是解决水资源供需矛盾的重要措施。自新中国成立以来,陕西省修建了大量的水利工程,其中均质坝或土石坝大多采用当地广泛存在的黄土作为防渗材料,但限于当时的科学技术水平,对筑坝黄土的分散性研究并不多。由于近年水利工程管涌、溃坝及其他病害现象的增多,筑坝土料的分散性逐步引起工程界的重视。同时,随着黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的实施,水利工程建设迎来了一个快速良好的发展契机。所以,研究黄土的分散性对于指导今后水利工程的设计、施工等具有非常的必要性。

从抗水冲蚀及渗透稳定的角度出发,将细粒土分为分散土、过渡土和非分散土^[1]。分散土的抗冲蚀能力很低,在低含盐量水或纯净水中细颗粒土间的黏聚力大部分甚至全部丧失,土颗粒体自行分散为原级黏土颗粒,易发生表层降水侵蚀和内部管涌破坏等危害^[2-5]。有关研究表明^[6,7],细粒土的分散性有内因和外因两个方面。内因是由土的物理化学性质决定的,物理性质主要是土体中的黏粒含量较低(可称之为物理性分散);化学性质主要是土体中含有大量的钠离子,而且土体呈强碱性,这两个因素缺一不可(可称之为化学性分散);外因是冲蚀水的化学组分和浓度^[8-11]。陕北黄土中黏粒含量比较少,主要以粉粒为主^[12],同时由于地下水强烈蒸发的作用,部分黄土出现钠盐渍化的特征,引起土体的化学成分及双电层厚度发生变化,进而导致土体

的抗冲蚀性大大降低。已有工程实践表明,在黄土区的黄河小浪底水库^[13]、王瑶水库^[14]、南坪水库^[15]、黑河水库^[16]、引额济克(乌)工程^[17]、文家沟水库^[18]等防渗土料具有一定的分散性。由此来看,具有分散性的黄土分布比较广泛,在工程实践中值得重视与研究,尤其是在黏粒含量较低的陕北区域,更应重视黄土的分散性。

本文采用野外调查分析、经验公式判别、室内试验研究等方法对位于陕北黄土区的 7 座水库 10 组筑坝黄土土样的分散性进行了判别,通过测定土料的黏粒含量、孔隙水可溶性阳离子含量、交换性钠离子百分比含量和对比分析库水对土的分散性的影响,阐明分散土产生分散的机理,并采用石灰对其中 4 组分散性较强的土样进行改性处理,探讨石灰剂量和养护龄期对改性效果的影响。研究结果对于系统了解陕北黄土的分散性并采取合理的处置措施具有重要的理论意义与工程实践指导价值。

1 试验材料与研究方法

1.1 土样的基本性质

土样的基本物理化学与黏土矿物含量见表 1。表 1 表明,10 组土样的颗粒组成以粉粒为主,黏粒含量较低。从界限含水率来看,都属于低液限黏土(CL)。X 射线衍射分析表明,10 组土样的黏土矿物成分主要为伊利石,占全土的 6.7%~13.6%,部分伊利石以伊利石-蒙脱石混层矿物形式存在,蒙脱石含量占全土的 1.9%~6.9%,且以伊利石-蒙脱石混层矿物形式存在。

表 1 土样物理化学性质及黏土矿物成分

土样 编号	颗粒组成/%			液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性 指数 I_p	最优 含水率 w_{OP} /%	最大 干密度 ρ_{dmax} /($g \cdot cm^{-3}$)	易溶 盐	中溶 盐	难溶 盐	有机 质	酸碱度 (pH)	伊利 石 /%	蒙脱 石 /%	高岭 石 /%	绿泥 石 /%	取土 地点
	砂粒	粉粒	黏粒															
1	22.5	64.0	13.5	31.9	16.6	15.3	14.9	1.80	0.3	1.90	137	1.7	8.85	10.2	4.9	1.5	1.8	石峁
2	13.0	77.8	9.2	28.5	16.8	11.7	13.5	1.70	0.7	1.82	—	6.3	9.16	10.9	2.7	1.2	2.8	新桥
3	9.7	86.7	3.6	34.9	18.6	16.3	15.2	1.67	1.0	0.90	103	2.0	9.11	6.7	3.1	0.9	1.6	张家峁
4	5.0	84.8	10.2	28.0	18.8	9.2	14.2	1.74	0.3	1.10	150	5.0	7.81	12.8	1.9	1.9	4.4	中山川
5	5.0	83.1	11.9	28.9	13.8	15.1	16.1	1.69	0.4	1.80	—	3.3	7.91	9.3	3.7	0.9	1.7	孙台
6	3.7	81.2	15.1	35.5	20.5	15.0	18.6	1.67	0.4	1.10	189	4.6	7.80	13.6	3.8	1.5	2.6	李家河
7	5.4	86.4	8.2	33.4	18.4	15.0	16.5	1.69	0.3	0.80	171	4.1	8.36	13.1	5.5	2.2	3.4	蒋家窑则
8	9.5	81.3	9.2	33.0	19.7	13.3	17.5	1.71	0.3	0.65	—	2.4	8.41	11.4	4.6	1.6	2.6	蒋家窑则
9	11.8	82.9	4.6	34.4	19.2	15.2	16.4	1.71	0.4	0.60	135	2.0	8.72	8.3	6.9	1.5	2.5	蒋家窑则
10	14.4	79.7	5.9	33.2	18.1	15.1	17.0	1.72	0.4	0.61	—	2.6	8.93	6.7	5.2	1.0	1.9	蒋家窑则

1.2 水样的基本性质

库水水样化学性质见表 2。表 2 表明,采自 2、

3、7 土样修建的水库库水中含有大量的可溶性盐分,矿化度较高,酸碱度呈强碱性(8.5~9.5);其他

几组土样修建的水库库水中矿化度相比来说比较低,酸碱度呈强碱性(8.5~9.5)、碱性(7.5~8.5)或中性(6.5~7.5)。

表 2 水样性质

水样 编号	矿化度 /(mg· L ⁻¹)	酸碱 度 (pH)	水类型	取样地点
1	257.0	7.37	HCO ₃ ⁻ -K ⁺ +Na ⁺ -Mg ²⁺	石岭
2	5073.3	8.67	Cl ⁻ -K ⁺ +Na ⁺ -Mg ²⁺	新桥
3	2033.8	9.31	Cl ⁻ -HCO ₃ ⁻ -K ⁺ +Na ⁺	张家岭
4	516.0	8.41	HCO ₃ ⁻ -SO ₄ ²⁻ -K ⁺ +Na ⁺	中山川
5	110.2	8.51	Cl ⁻ -HCO ₃ ⁻ -Mg ²⁺ -K ⁺ +Na ⁺	孙台
6	247.7	8.75	HCO ₃ ⁻ -K ⁺ +Na ⁺ -Mg ²⁺	李家河
7	5898.2	8.75	Cl ⁻ -K ⁺ +Na ⁺ -Mg ²⁺	蒋家窑则

1.3 研究方法

(1) 土样的分散性采用野外调查分析^[19]、经验公式判别^[6]、室内试验研究等方法进行。其中室内试验包括泥球试验^[20]和针孔试验方法^[21]。

(2) 土的分散机理研究试验采用双密度计试验^[22]、孔隙水可溶性阳离子含量^[23]、交换性钠离子百分比含量^[24]等试验方法。

2 土的分散性判别

细粒土的分散性评价方法,根据工程的进展程度与重要性,一般可依据野外调查法、经验公式判别法和室内试验判别法。

2.1 野外调查分析

分散土的鉴定应当从野外调查开始。分散土的野外调查是初步了解土料特性的必要手段,也是室内试验判别结果的佐证。如果野外调查的结果与室内试验结果有出入时,应以室内试验结果为最终鉴定结果。

分散土分布的地区,下雨后路旁的水沟、水坑和河道里流的水都是浑浊的。水坑里的水长期浑浊,呈黄色或咖啡色。水坑干涸后坑底会留下很细的黏土沉积,干后出现龟裂。分散土坡面在降雨作用下,容易出现冲沟和孔洞等异常冲蚀形式的表面迹象,如通过分散土地区的防洪和灌溉用的挖方渠道以及自然河道,边坡容易受到冲蚀,沟底容易被掏蚀变深;道路的路基边坡也容易在雨水的作用下受到侵蚀,表面形成冲沟。在料场如果可看到新鲜的土层断面或土块在雨水的作用下仍然基本上保持完好,则土料可能为非分散土。表层土有可能在多年的雨水淋溶和植物覆盖作用下,其物理化学性质发生变

化,如含有较多的有机质,其分散性较弱,表现为非分散土的特征。因此,自然土坡的表层一般不具有分散性。由于分散土的分布有可能呈层状出现,表层土没有表面冲蚀迹象并不能保证整个剖面的土体就是非分散土。

对 7 座水库筑坝黄土土料场的野外调查分析见图 1。从野外调查来看,这些土料场虽然出现明显的水土流失特征,但是没有出现分散土的典型特征,即下雨后路旁的水沟、水坑和河道里流的水虽然浑浊,但是很快就澄清。这些水力侵蚀特征属于一种黏粒含量较低的土在降雨径流作用下发生的面蚀或沟蚀。依照野外调查分析,这些土样应属于一种过渡土或非分散土。



图 1 部分水库土料场冲蚀调查照片

2.2 经验公式判别

樊恒辉等^[25]基于细粒土的分散机理,构建了判别细粒土分散性的经验公式,并提出了物理性分散土(或称之为低凝聚性土)和化学性分散土的分类。物理性分散土属于一种由于黏粒含量低引起的分散;化学性分散土是由于土体中含有钠离子和酸碱度呈碱性引起的分散。根据黏性土分散性的经验判别公式可对土样的分散性进行初步判别,并可分析其分散机理。经验判别公式见下式:

$$F_1 = 4 - 0.01(2W_L + P_c) \tag{1}$$

$$F_2 = 4 - 0.01(2W_L + P_c - P_s) \tag{2}$$

$$F_3 = 4 - 0.01(2W_L + P_c - P_s) + 0.1pH \tag{3}$$

式中: F_n 为土的分散值; W_L 为液限,%; P_c 为黏粒(<0.005 mm)含量,%; P_s 为钠百分比,%;pH 为酸碱度。

土样分散性经验判别结果见表 3。由表 3 可看

出,土样 2 号、3 号、4 号、5 号、9 号和 10 号的 F_1 值大于 3.26,因此属于物理性分散土。剩余的 1 号、6 号、7 号和 8 号土样的 F_2 值介于 3.16 和 4.06 之间,不能确定; F_3 值介于 4.00 和 4.50 之间,可判别为过渡土。由此来看,这 10 组土样应属于物理性分散土或过渡土。

表 3 土的分散性经验公式判别结果表

土样编号	液限 /%	黏粒含量 /%	钠百分比 /%	酸碱度 pH	F 系列值及结果					
					F_1	结果	F_2	结果	F_3	结果
1	31.9	13.5	9.5	8.85	3.23	—	3.32	—	4.21	过渡土
2	28.5	9.2	53.9	9.16	3.34	分散土	—	—	—	—
3	34.9	3.6	87.1	9.11	3.27	分散土	—	—	—	—
4	28.0	10.2	62.0	7.81	3.34	分散土	—	—	—	—
5	28.9	11.9	27.4	7.91	3.30	分散土	—	—	—	—
6	35.5	15.1	29.1	7.80	3.14	—	3.44	—	4.22	过渡土
7	33.4	8.2	27.8	8.36	3.25	—	3.53	—	4.37	过渡土
8	33.0	9.2	20.2	8.41	3.25	—	3.45	—	4.30	过渡土
9	34.4	4.6	52.4	8.71	3.27	分散土	—	—	—	—
10	33.2	5.9	93.6	8.93	3.28	分散土	—	—	—	—

判别标准:①如果 F_1 值大于 3.26,则土样属于物理性分散土(或低凝聚性土);如果 F_1 值小于等于 3.26,则继续引入钠离子百分比计算 F_2 值。②如果 F_2 值大于 4.06,土体属于分散土;如果小于 3.16,属于非分散土;如果在 3.16 和 4.06 之间,不能确定,则继续引入酸碱度计算 F_3 值。③如果 F_3 值大于 4.50,可判别为化学性分散土;介于 4.00 和 4.50 之间,可判别为过渡性土;小于 4.00,可判别为非分散土。

2.3 室内试验判别

根据野外调查分析和经验公式判别,发现筑坝黄土具有物理分散性或过渡性。为了准确判别土样的分散性,需要通过室内的泥球试验和针孔试验做进一步判别。泥球试验适用于所有细粒土,针孔试验仅适用于黏粒含量不低于 10% 的细粒土。当黏粒含量低于 10% 时,采用泥球试验的判别结果作为判别依据;当黏粒含量不低于 10% 时,以泥球试验和针孔试验的判别结果做为综合判别依据;若泥球试验和针孔试验出现判别结果不一致时,从工程安全的角度来考虑,取分散性最强的判别结果作为最终判别结果^[7]。

此外,根据细粒土的分散机理,将分散土分为物理性分散土、化学性分散土、物理-化学复合性分散土。化学分散土是由于土体中含有大量的钠离子和酸碱度呈碱性,导致双电层厚度增大,因此土颗粒分散成原级颗粒;物理性分散土是由于土体中黏粒含量较少,土颗粒间缺乏足够的胶结物质,导致遇水后出现类似于砂土的特性;物理-化学复合性分散土是两者兼而有之。为了避免工程界对“分散土”一词的敏感性,将“物理性分散土”称之为“低凝聚性土”。

判别分散土的类型,可采用两种方法进行确定。第一种方法是根据黏粒含量进行区分,即黏粒含量 10% 是细粒土产生物理性分散的大致界限。当黏粒

含量低于 10%,如果泥球试验有分散性,称之为物理-化学复合性分散土,反之称之为物理性分散土;当黏粒含量大于 10% 时,泥球试验表现为分散性,则称之为化学分散性土。第二种方法是根据泥球试验和针孔试验的结果来区分,当泥球试验表现为非分散性且针孔试验表现为分散性时称之为物理性分散土,当泥球试验表现为分散性时称之为化学性分散土。如果土样为化学性分散土,且黏粒含量低于 10%,称之为物理-化学复合性分散土。

(1) 泥球试验。土样泥球试验结果见图 2、表 4。图 2 是选取的几组有代表性的照片。在泥球崩解过程中,土样 3 和 10 在泥球放入水中后崩解速度迅速,土很快扩散到整个杯底,水呈雾状,经久不清,属于分散土;土样 2 和 5 在崩解后四周仅有微量浑浊,扩散范围较小,属于过渡土;土样 1、4 和 6、7、8、9 没有分散出胶粒反应,土块崩解后在杯底以细颗粒状平堆,水色澄清,属于非分散土。

(2) 针孔试验。土样针孔试验结果见图 3、表 4。图 3 是选取的几组有代表性的照片。由于针孔试验是模拟在动水作用下土体的抗水蚀状况,而黏粒含量低于 10% 的土本身黏聚性较差,很容易被流动的水流带走流失,所以针孔试验不适宜于黏粒含量低于 10% 的土样。因此,对于黏粒含量低于 10% 的 2、3 和 7、8、9、10 号土样虽然也做了针孔试验,但判别结果仅作为参考,不参与综合判别,仅对黏粒含

量大于 10% 的 1、4、5 和 6 号土样进行判别。在针孔试验冲蚀过程中,土样 1 和 6 在 1 020 mm 的水头下,针孔没有变化,水样清澈,属于非分散土;土样 4 和 5 分别在 180 mm、380 mm 的水头下,针孔扩大数倍,水样浑浊,属于过渡土。

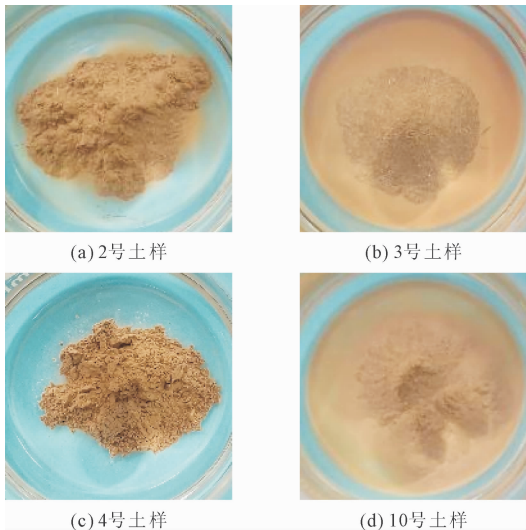


图 2 土样泥球试验照片(纯水)

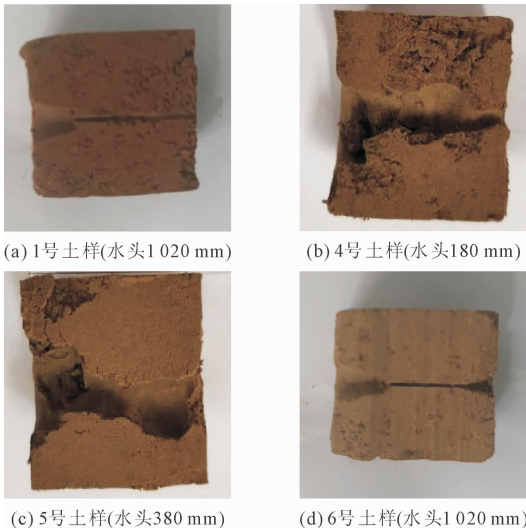


图 3 土样针孔试验判别结果(纯水)

依据前述的综合判别准则,在黏粒含量大于 10% 的 1、4、5 和 6 号土样中,土样 1、6 的泥球试验和针孔试验的结果均表现为非分散性,所以属于非分散土;5 号土样的泥球试验和针孔试验均表现为过渡性,因此属于过渡土;4 号土样泥球试验和针孔试验不一致,分别表现为分散性和过渡性,该土的黏粒含量 10.2%,正好处于物理性分散土的界限,根据前述的第二种判别分散土类型的方法,将 4 号土样划分为低凝聚性土(物理性分散土)。在黏粒含

量小于 10% 的 2、3、7、8、9 和 10 号土样中,土样 3 和 10 由于泥球试验表现为分散性特征,属于物理 - 化学复合性分散土;2 号土样的泥球试验表现为过渡性,因此属于过渡土;7、8 和 9 号土样泥球试验表现为非分散性土,划分为低凝聚性土(物理性分散土)。

表 4 土样分散性综合判别结果(纯水)

土样 编号	黏粒 含量 /%	泥球试验		针孔试验					综合 判定
		水色	判定	水头 /mm	持续 时间 /min	终了 孔径 /倍	水色	判定	
1	13.5	清澈	非	1020	5	1	清澈	非	非
2	9.2	微浑	过	50	10	3	浑浊	—	过
3	3.6	浑浊	分	50	10	2	浑浊	—	物化分
4	10.2	清澈	非	180	4	9	浑浊	过	低
5	11.9	微浑	过	380	2	10	浑浊	过	过
6	15.1	清澈	非	1020	5	1	清澈	非	非
7	8.2	清澈	非	180	5	9	浑浊	—	低
8	9.2	清澈	非	50	10	4	浑浊	—	低
9	5.3	清澈	非	180	5	10	浑浊	—	低
10	5.9	浑浊	分	50	10	5	浑浊	—	物化分

注:①泥球试验:分散土,土块水解后混浊,土很快扩散到整个量杯底部,水呈雾状,经久不清;过渡土,土块水解后四周有微量混浊,但扩散范围小;非分散土,无分散出胶粒的反应,土块水解后在量杯底部以细颗粒状平堆,水色是清的,或稍混浊后很快又变清。②针孔试验:非分散土,在 380 mm ~ 1 020 mm 水头下针孔不扩大,出水流很清;过渡土,在 180 mm ~ 380 mm 水头下针孔冲蚀较慢,出水流稍混浊;分散土,在 50 mm 水头下针孔迅速扩大,出水流混浊。③非 - 非分散土;过 - 过渡土;物化分 - 物理化学复合性分散土;低 - 低凝聚性土。

3 土样分散机理分析

细粒土产生分散的机理有内因和外因两个方面,内因主要是土中黏粒含量与土体中钠离子和酸碱度作用,外因是环境水和土体压实度的作用。土中的黏土矿物类型与含量和黏土的分散性没有必然关系^[25]。

3.1 土样分散机理内在因素分析

土的分散性与土体的物理化学性质有直接的关系,主要与黏粒含量、钠离子和酸碱度等致散因子有关。从物理指标分析,由于黏粒颗粒细小,具有很大的表面积,黏接力很强,可提高土颗粒之间的黏聚性。如果土体中的黏粒含量较低,土颗粒大部分呈单个颗粒形式的存在,当遇到水流冲蚀时,就表现出类似于细砂分散的性质。从化学角度分析,当土体中含有较多的钠离子且酸碱度呈碱性时,土颗粒带

的负电荷增加,吸附的钠离子越多,双电层越厚,土颗粒间的排斥力大于吸引力,净势能表现为斥力,悬浮液中颗粒的分散倾向就越大。

表 5 为 10 组土样的双密度计试验、孔隙水可溶性阳离子试验、交换性钠离子百分比试验和酸碱度

试验结果。双密度计试验适用于黏粒含量不小于 10% 的细粒土,孔隙水可溶性阳离子试验、交换性钠离子百分比试验适用于所有细粒土。因此,对于黏粒含量低于 10% 的土样,虽然进行了双密度计试验,但是未计算分散度,试验数据仅作为参考。

表 5 土样分散机理内在因素试验结果

土 样 编 号	双比重计试验			孔隙水可溶盐阳离子试验						交换性钠离子百分比试验			酸 碱 度 pH
	黏粒含量/%		分散度 D/%	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	阳离子 总量	钠百 分比 P _s /%	交换性	交换性	交换性钠	
	非常规 试验	常规 试验								钠离子含量	阳离子含量	离子百分比	
										/(cmol·kg ⁻¹)	/(cmol·kg ⁻¹)	ESP/%	
	/(1/n mmol/l)												
1	3.3	13.5	24.4	0.11	0.04	0.49	0.01	1.14	9.5	0.085	13.56	0.6	8.85
2	0.0	9.2	—	1.93	0.10	0.77	0.01	3.59	53.9	0.707	7.54	9.4	9.16
3	1.7	3.6	—	1.64	0.10	0.00	0.06	1.87	87.8	1.738	5.88	29.6	9.11
4	9.5	10.2	93.1	1.93	0.06	0.44	0.12	3.12	62.0	0.099	8.67	1.1	7.81
5	2.3	11.9	19.3	0.43	0.16	0.41	0.07	1.55	27.4	0.081	8.69	0.9	7.91
6	3.3	15.1	21.9	0.64	0.12	0.40	0.33	2.21	29.1	0.154	12.07	1.3	7.80
7	0.0	8.2	—	0.51	0.05	0.42	0.22	1.84	27.8	0.086	7.59	1.1	8.36
8	0.0	9.2	—	0.43	0.07	0.38	0.43	2.11	20.2	0.090	7.42	1.2	8.41
9	0.0	5.3	—	1.64	0.07	0.08	0.63	3.13	52.4	0.174	6.87	2.5	8.72
10	0.0	5.9	—	2.66	0.09	0.02	0.02	2.84	93.6	0.428	6.71	6.4	8.93

依据分散性判别结果可知,土样 3 和 10 属于物理-化学复合性分散土。从表 5 中可知,这两组土样的黏粒含量分别是 3.6%、5.9%,土体中的钠百分比分别是 87.8%、93.6%,交换性钠离子百分比分别是 29.6%、6.4%,pH 值分别是 9.11、8.93。由于黏粒含量低于 10%,具有物理分散土的特征,同时钠离子含量很高,而且酸碱度呈强碱性。在泥球试验中,这 2 组土样均表现为分散土特征,因此,这两组土样属于物理-化学复合性分散土。

与呈物理-化学复合性分散的土样 3 和 10 相比较而言,土样 1、2、5、6 钠离子含量比较低,或者酸碱度含量偏碱性,或者黏粒含量高,因此,引起的分散性有限,使得土样 2、5 呈过渡性,土样 1、6 呈非分散性。由于 4、7、8、9 土样黏粒含量低于或略大于 10%,土颗粒之间缺少黏聚性,属于低凝聚性土(物理性分散土)。

从双密度计试验结果来看,土样 1、5 和 6 分散度分别为 24.4%、19.3%、21.9%,表明这几组土遇水后自行分散成原级颗粒的能力较低。但是,土样 4 的分散度为 93.5%,遇水后分散成原级颗粒的能力比较高。出现此状况,一方面与孔隙水阳离子中钠离子含量高有关,另一方面可能是因为该土的黏粒含量略大于 10%,与双密度计方法不适用于黏粒含量小于 10% 的规定有关。

3.2 土样分散机理外在因素分析

(1) 泥球试验结果分析

土样泥球试验判别结果(库水)见图 4。

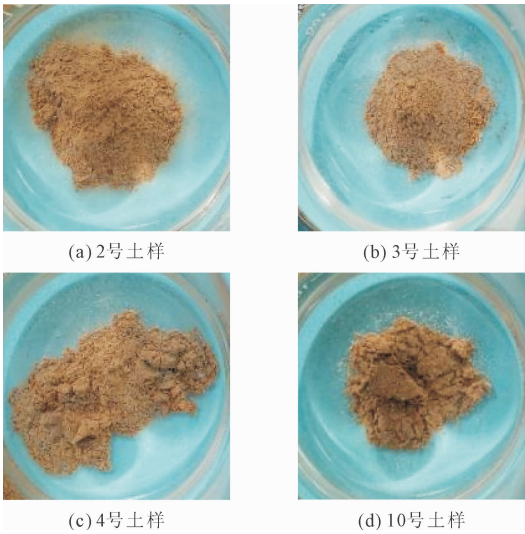


图 4 土样泥球试验判别结果(库水)

(2) 针孔试验。土样针孔试验结果见图 5、表 6。图 5 是选取的几组有代表性的照片,与图 3 对比可明显发现,在库水的冲蚀作用下,黏粒含量大于 10% 的 1、4、5 和 6 号土样冲蚀状况没有改变,依旧分别表现为非分散土、过渡土、过渡土和非分散土。相对而言,黏粒含量小于 10% 的部分土样在针孔试

验中,表现为抗水蚀的水头增大,水流颜色变浅,即抗蚀能力有所增强,但特征不显著,如土样 3、9。

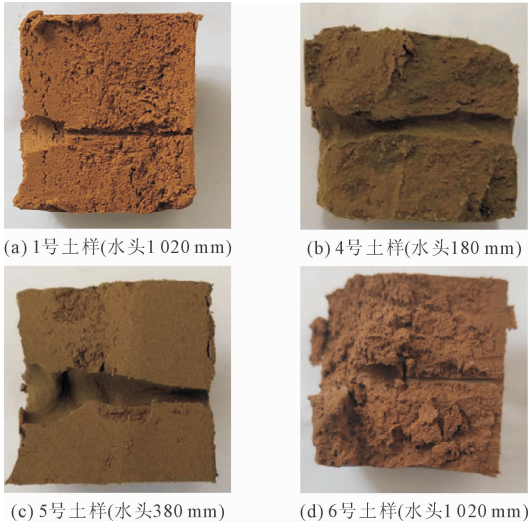


图 5 土样针孔试验判别结果(库水)

依据泥球试验和针孔试验的综合判别规则可知,在库水作用下,原呈物理-化学复合性分散土的 3、10 号土样由于泥球试验表现为非分散性,但是由于黏粒含量低于 10%,因此转变为低凝聚性土。同样,原呈过渡土的 2、5 号土样由于泥球试验表现为非分散性,但由于 2 号土样的黏粒含量低于 10%,因此也转变为低凝聚性土;5 号土样的黏粒含量大于 10%且针孔试验表现为过渡性,因此 5 号土样仍为过渡土。原呈非分散土的 1、6 号土样依旧属于非分散土。原呈物理性分散土(低凝聚性土)的 4、7、8、9 号土样没有变化。由此来看,在库水作用下,有 1 组土样表现为过渡性,2 组土样表现为非分散性,其他 7 组土样均为低凝聚性土。

表 6 土样分散性综合判别结果(库水)

土样 编号	黏粒 含量 /%	泥球试验		针孔试验					综合 判定
		水色	判定	水头 /mm	持续 时间 /min	终了 孔径 /倍	水色	判定	
1	13.5	清澈	非	1020	1	1	微浑	非	非
2	9.2	清澈	非	50	10	5	浑浊	—	低
3	3.6	清澈	非	180	3	15	浑浊	—	低
4	10.2	清澈	非	180	5	10	浑浊	过	低
5	11.9	清澈	非	380	2	7	浑浊	过	过
6	15.1	清澈	非	1020	1	1	浑浊	非	非
7	8.2	清澈	非	180	10	1	浑浊	—	低
8	9.2	清澈	非	50	10	1	可见	—	低
9	5.3	清澈	非	380	1	1	微浑	—	低
10	5.9	清澈	非	50	10	5	浑浊	—	低

由表 2 可知,7 座水库的库水中溶解有较多的可溶性盐分,矿化度较高,尤其是 2、3、10 号土样修建水库的库水,水样矿化度在 2 033.8 mg/L ~ 5 898.2 mg/L 之间。根据双电层理论可知,高矿化度的库水使得土颗粒间的双电层厚度减小,分散性减弱。因此,库水下泥球试验均表现为非分散土。相比较而言,针孔试验的改性程度不是非常明显,这是因为泥球试验和针孔试验分别模拟了静、动水作用下土的分散与冲蚀特性,两个试验反应的特性不同而不同。值得特别说明的是,这也是某些大坝的筑坝土料为什么是分散土而大坝仍在安全运行的原因。

4 石灰改性土试验

工程实践表明,石灰加入土中后通过阳离子交换作用、碳酸钙作用和火山灰作用等,可增强土颗粒间的黏聚力,提高抗水蚀性,对分散土具有良好的改性效果。为了进一步探索石灰处理土样分散性的效果,本研究选取属于物理-化学复合性分散的 3 号和 10 号土样、属于过渡土的 2 号土样以及属于低凝聚土的 4 号土样,分析了石灰剂量和养护龄期对改性影响的试验研究,其结果见图 6—图 8。

4.1 石灰改性土泥球试验

4 组土样在掺入石灰后,所有剂量和养护龄期下改性土样的泥球试验均无胶粒分散出,水色清澈,属于非分散土。以 3 号土样的养护龄期 0 d(即搅拌后)为例(见图 6),可以看出,在静水条件下,石灰可有效降低土的分散性,由分散土(图 2(b))转变为非分散土。

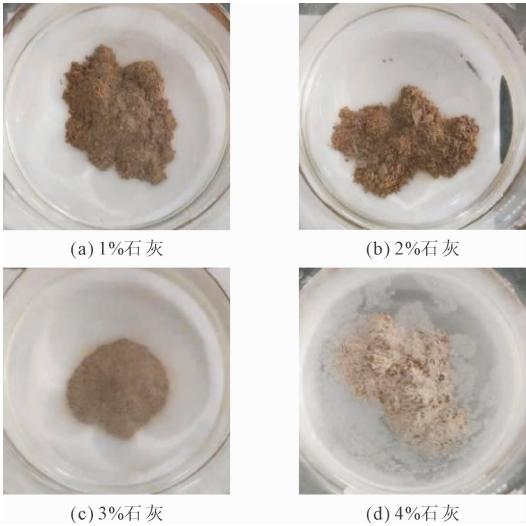


图 6 石灰改性土的泥球试验结果(养护龄期 0 d)

4.2 石灰改性土针孔试验

图 7、图 8 为石灰改性的针孔试验结果。可以看出,随着石灰掺量和龄期的增加,4 组土样的改性效果愈发显著,针孔大小没有变化,水流清澈。以土样 3 为例,当石灰剂量为 1% 和 2% 时,在养护龄期达到 7 d 时还没有改性效果;当剂量在 3% 时,养护龄期从 0 d 增至 3 d、7 d,土样由分散土转变为过渡土、非分散土;当剂量在 4% 时,养护龄期在 0 d 和 3 d

时土样为过渡土,7 d 转变为非分散土;剂量 5% 时,养护龄期在 0 d 时土样变为过渡土,3 d、7 d 为非分散土。

由石灰改性土的泥球试验和针孔试验结果可看出,石灰对分散土及过渡土和低凝聚性土具有很好的改性增强效果,能够大大提高抗水蚀特性。另外,若以 7 d 养护龄期的改性结果来评价石灰剂量的大小,则土样 2、3、4、10 的石灰最优剂量分别为 1%、3%、1%、1%。土样 3 掺加石灰剂量多的原因可能和土的颗粒级配、活性二氧化硅、阳离子含量、有机质含量、酸碱度、黏土矿物含量等物理化学及矿物学成分有关,值得进一步研究。

5 结 论

- (1) 陕北筑坝黄土大部分由于黏粒含量低而表现为低凝聚性土(物理性分散土),一部分表现为物理-化学复合性分散土、过渡土及非分散土。同时,由于库水中矿化度含量较高,有效地抑制了土体的分散性,提高了抗冲蚀性。因此,虽然有些筑坝土料具有一定的分散性,但是在实际情况下,分散性减弱甚至消失,坝体得以安全运行。
- (2) 石灰是一种较好的分散土或低凝聚性土改性剂。在新建或病险库维修改造时,考虑到工程实际施工建设情况,可掺加剂量 1%~3% 的石灰进行改性处理,尤其是在与坝肩接触、埋置管道等重要部位进行改性换填。
- (3) 分散土属于一种水敏性的特殊土,其分散产生原因既有内部因素又有外部因素,既有物理作用又有化学作用,应分析土-水-电解质系统中各部分的关系,深入研究物理性分散土与化学性分散土对水质的不同响应特征、对反滤层级配大小的影响,以便更好指导工程实践。

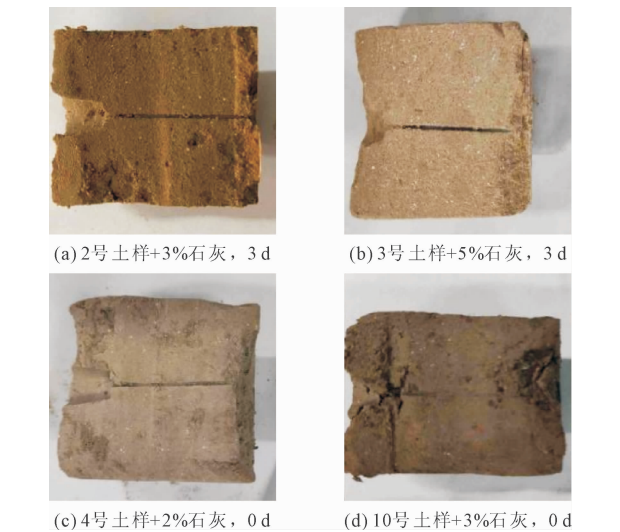


图 7 石灰改性土的针孔试验结果

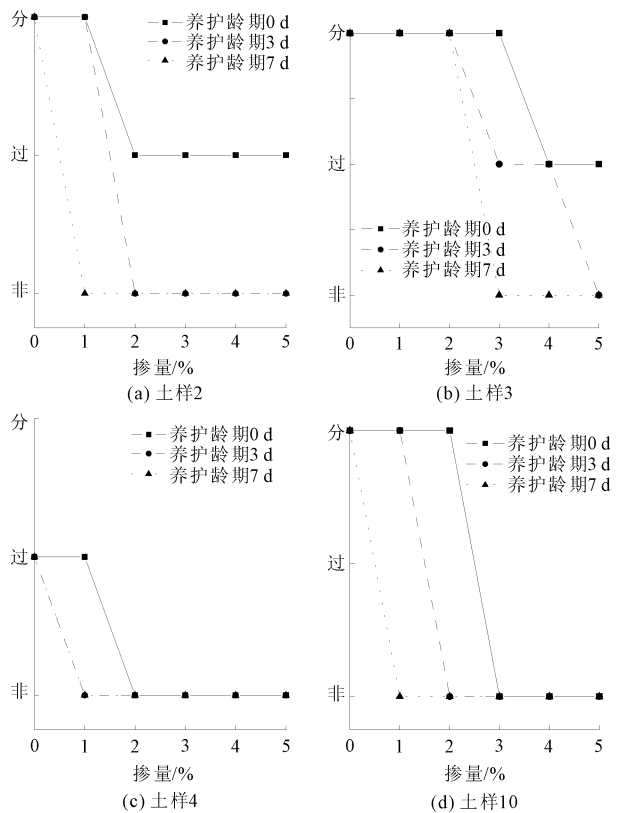


图 8 石灰改性剂量和龄期与改性效果关系

参考文献:

[1] 陈正汉,郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学,2019,40(1):1-54.

[2] 樊恒辉,赵高文,李洪良. 分散性黏土研究现状与展望[J]. 岩土力学,2010,31(S1):108-114.

[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.

[4] Petry T M. Identification of Dispersive Clay Soils by A Physical Test [D]. USA: Oklahoma State Univnrsity, 1974.

[5] Cole D C H, Lewis J G. Piping failure of earthen dams built of plastic materials in arid climates[C]//Proceed-

- ings of the Third Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sydney: Foundation Enginery /Instiute Enginery, 1960:93-99.
- [6] Fan H H, Kong L W. Empirical equation for evaluating the dispersivity of cohesive soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 50(9):989-994.
- [7] 陶然, 孟敏强, 张文博, 等. 基于分散机理的细粒土分散性判别方法研究[J/OL]. 岩土工程学报, 2022:1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20220424.1635.002.html>.
- [8] 樊恒辉, 李鹏, 高明霞. 水对针孔试验鉴定分散性黏土结果影响的试验研究[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(5):42-44.
- [9] 于润波, 张滨. 水质对分散性黏土冲蚀破坏的影响[J]. 黑龙江大学工程学报, 2005, 32(3):23-25.
- [10] 李洪良, 樊恒辉, 党进谦, 等. 介质环境中阳离子和酸碱度变化对黏土分散性的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(6):26-29.
- [11] 田堪良, 张慧莉, 樊恒辉. 分散性黏土鉴别方法及工程防治措施研究综述[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2):204-209.
- [12] 张永双, 曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. 工程地质学报, 2005(1):18-28.
- [13] 秦曰章. 黄河小浪底黏性土分散性能的试验研究[J]. 人民黄河, 1981(5):8-12.
- [14] 徐铁铮, 樊邦稳, 徐天渊, 等. 王瑶水库加坝扩容工程筑坝土料分散性研究[J]. 资源环境与工程, 2020, 34(1):104-108.
- [15] 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.
- [16] 樊恒辉, 李鹏. 黑河土料物理化学性质、分散性鉴定和黏土矿物成分试验报告[R]. 杨凌:水利部西北水利科学研究所, 2001.
- [17] 樊恒辉, 吴普特, 李鹏, 等. 分散性土判别试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11):1310-1316.
- [18] 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.
- [19] 樊恒辉, 孔令伟. 分散性土研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [20] Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by the crumb test: D6572[S]. USA: American Society for Testing and Materials.
- [21] Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by the pinhole test: D4647[S]. USA: American Society for Testing and Materials.
- [22] Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer: D4221[S]. USA: American Society for Testing and Materials.
- [23] Standard test methods for pore water extraction and determination of the soluble salt content of soils by refractometer: D4542[S]. USA: American Society for Testing and Materials.
- [24] Standard test method for measuring the exchange complex and cation exchange capacity of inorganic fine-grained soils: D7503[S]. USA: American Society for Testing and Materials.
- [25] 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):1760-1765.