

基于裂缝冲刷试验的分散性土自愈性研究

张晓飞¹, 陈新炜¹, 严涛², 张文伟¹, 李守义¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 为研究分散性土裂缝自愈特性,以西安某矿场天然分散性土的土样和某大坝工程库区土样为研究对象,并以生石灰和碳酸钠盐为分散剂,开展分散性鉴定试验、土体基本性质试验和室内裂缝冲刷试验,探究分散性、土体基本性质和反滤料级配对分散性土裂缝自愈性的影响。结果表明:同一反滤料下,土体的分散性越高,则其裂缝表面土颗粒湿化崩解后掉落的颗粒越小,裂缝愈合越慢,最终自愈程度越好。裂缝自愈特性受到土体基本性质等多种指标变化的影响,其中酸碱度影响最为显著。同一试验土样下,反滤料颗粒粒径越小,则反滤层辅助防渗效果越好,裂缝愈合质量越好。

关键词: 分散性土; 裂缝自愈性; 裂缝冲刷试验; 心墙防渗土料; 反滤料

中图分类号: TU411; TV641.2⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2022)06-0167-07

Self-healing capability of dispersive soil based on crack scouring test

ZHANG Xiaofei¹, CHEN Xinwei¹, YAN Tao², ZHANG Wenwei¹, LI Shouyi¹

(1. School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to study the self-healing characteristics of cracks in dispersive soil, a series of dispersibility identification tests, soil basic property tests and indoor crack scouring tests were conducted on natural dispersive soil samples from a mine in Xi'an City and soil samples from the reservoir area of a dam project, with quicklime and sodium carbonate as the dispersants. According to the tests, the effects of soil dispersibility, soil basic properties and inverted filter material gradation on the self-healing characteristics of cracks in dispersive soil were investigated. The test results show that under the same inverted filter material, the higher the dispersibility of the soil mass, the smaller the soil particles fallen from the crack surface after wetting and disintegration, the slower the crack healing and the better the final self-healing effect. The self-healing characteristics of cracks are influenced by the changes of various indicators such as the basic properties of soil, among which the influence of pH is the most significant. Under the same test soil sample, as the particle size of the inverted filter decreases, the auxiliary impermeability effect of the inverted layer and the crack healing quality improves.

Key words: dispersive soil; crack self-healing capability; crack scouring test; core wall impermeable soil; inverted filter material

1 研究背景

随着国内外土石坝工程建设的发展,用于心墙土料的土质选用范围不断扩大,许多工程开始采用分散性土作为土石坝的心墙土料^[1-2]。分散性土遇低含盐量的渗流水时,土粒会分散流失,易产生管涌破坏^[3-4]。采用分散性土作土石坝的防渗心墙土料

时,蓄水初期心墙防渗体会发生冲刷破坏,给土石坝带来严重危害^[5-7]。因此对分散性土作为土石坝心墙土料时的坝体抗渗性能进行研究很有必要,但国内在土壤的渗透性研究方面多以黄土、粉土和黏土为主,而对分散性土的渗透性研究较少。魏诚寅^[8]和焦浩然^[9]研究了粉土和黏土的渗透性受孔隙比、黏粒含量等土体基本性质的影响规律。杨德欢

收稿日期:2021-12-31; 修回日期:2022-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51479168);陕西省水利厅科技计划项目(2020slkj-12)

作者简介:张晓飞(1978-),男,陕西周至人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水工结构应力分析。

等^[10]通过研究不同孔隙盐溶液对黏土渗透性的影响规律,发现孔隙盐浓度会显著影响黏土的渗透性,但其受干密度制约。苏杰^[11]研究了不同宽度和不同深度裂缝对黄土渗透性的影响,得出同一埋深黄土的渗透性随裂缝宽度的增大而增大,且同一裂缝宽度下裂缝越靠近地表,其对黄土渗透性的影响越大的结论。Vakili 等^[12]和蒲泉等^[13]研究了分散性土的渗透性,总结了土体的分散程度、孔隙度、黏度等因素对土样渗透系数的影响,认为分散性土较差的渗透性可满足防渗心墙材料的要求。国内外学者对混凝土和黏土等裂缝自愈特性的研究成果较多,但对分散性土的自愈特性研究较少。Mohammadi 等^[14]研究了纳米蒙脱石添加剂对黏土自我修复过程的影响,结果显示,加入添加剂后的土壤物理力学性能发生了明显的变化,如塑性指数增加,抗压强度增大,从而提高了黏土的自愈性。Roushangar 等^[15-17]进行了土坝中黏土的自愈现象及其影响因素的试验,通过掺入膨润土来研究黏土裂缝的自愈性和渗漏率,得出结论:膨润土可以增强黏土的自愈能力;黏土抗渗性受含水量、压实度和构成矿物的影响;在一定范围内增大黏土塑性指数可以增加其自愈能力。党进谦等^[18]对某地区的分散性土进行了室内渗透变形和抗渗特性研究,通过设置不同的裂缝宽度,探究其对分散性土裂缝自愈性的影响,得出了最利于裂缝自愈的厚度。

综上所述,诸多学者对各种细粒土抗渗性能的影响因素进行了研究,但仅研究了裂缝宽度对裂缝自愈能力的影响,结论的普遍性有待进一步探讨,同时目前关于分散性土的各项基本性质、分散性和反滤料颗粒级配对裂缝自愈性的影响也尚不明确。本文通过裂缝冲刷试验来模拟大坝内部出现水平裂缝这一情况^[19-20],研究不同分散性和不同级配反滤料的保护作用对分散性土裂缝自愈性的影响,同时分析了土体基本性质对裂缝自愈性的影响程度,可为土石坝工程心墙材料及反滤层的选择提供依据。

2 分散性土样及反滤料制备

2.1 分散性土样制备及鉴定

为分析分散性对心墙土料裂缝自愈性的影响,本次研究选取来自某大坝工程项目区的非分散性土。取样时,除去表层土,取土深度为 1.0~2.5 m,为了保证土样为原状土,取土、包装及运输等全过程严格执行《水电工程天然建筑材料勘察规程》(NB/T 10235—2019)^[21]和《土工试验方法标准》(GB/T

50123—2019)^[22],通过向土样中加入不同质量的碳酸钠盐(Na_2CO_3)来配制不同程度的分散性土样^[23]。同时为了验证试验结论的准确性和普遍性,以进一步研究分散性土的裂缝自愈性,还选用了西安市某矿业天然分散性土矿样,在土样中添加不同质量百分比的生石灰作为改良剂^[24],配制成不同程度改性的分散性土。两组试验土样的编号及配制方法见表 1。

表 1 两组试验土样的编号及配制方法

试样编号	加入生石灰	试样编号	加入 Na_2CO_3
	试剂质量 百分数/%		试剂质量 百分数/%
KY-00	0.50	CA-00	0.00
KY-01	0.15	CA-06	0.06
KY-02	0.10	CA-10	0.10
KY-03	0.05	CA-20	0.20
KY-04	0.00	CA-40	0.40

采用针孔试验、碎块试验、交换性钠离子百分比试验^[23-25]对表 1 中 10 种土样的分散性进行鉴别,各土样分散性试验结果及综合评判结论见表 2。由表 2 可以看出,对于 KY 试样以及 CA-40、CA-20、CA-00 试样,3 种试验方法的结果完全一致,而 CA-06 和 CA-10 试样的试验结果有所不同,针对该种情况,目前公认的标准是当多种分散性鉴定方法的结论不完全统一时,当以针孔试验结果为主,以其他试验结果为参照,认定该土样为分散性^[26]。根据该原则,鉴定 CA-06 试样为过渡性土,CA-10 试样为分散性土。

表 2 土样的分散性试验结果

试样编号	针孔试验	碎块试验	交换性钠	综合结论
			离子百分 比试验	
KY-00	非分散性	非分散性	非分散性	非分散性
KY-01	过渡性	过渡性	过渡性	过渡性
KY-02	分散性	分散性	分散性	分散性
KY-03	分散性	分散性	分散性	分散性
KY-04	分散性	分散性	分散性	分散性
CA-00	非分散性	非分散性	非分散性	非分散性
CA-06	过渡性	过渡性	非分散性	过渡性
CA-10	分散性	过渡性	分散性	分散性
CA-20	分散性	分散性	分散性	分散性
CA-40	分散性	分散性	分散性	分散性

对两组试验土样的塑性指数、黏粒含量、孔隙度(以核磁共振 T_2 曲线积分总面积表示)、酸碱度和颗粒相对密度进行了测定,测定结果见表 3,图 1 为各试样

的颗粒级配曲线。由表 3 及图 1 可知,CA 试样的粒径普遍大于 KY 试样,且黏粒含量小于 KY 试样,可认为 KY 试样的颗粒级配优于 CA 试样且防渗性能更好。

表 3 各试验土样的基本性质测定结果

土样编号	塑性指数/%	黏粒含量/%	T_2 谱峰面积	酸碱度	颗粒相对密度	渗透系数/ $10^{-7}(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
KY-00	28.11	15.66	12668.36	8.25	2.74	3.71
KY-01	30.18	17.88	12090.79	8.32	2.73	3.50
KY-02	31.27	20.90	10938.43	8.30	2.73	2.24
KY-03	39.41	27.22	9831.86	8.44	2.73	1.51
KY-04	44.80	29.82	8545.06	9.45	2.73	0.77
CA-00	10.20	6.48	11182.32	7.73	2.73	9.20
CA-06	12.07	7.58	8750.82	8.66	2.73	6.01
CA-10	14.92	8.33	8115.61	9.20	2.73	5.63
CA-20	19.73	9.97	6635.58	9.53	2.72	1.92
CA-40	21.82	11.28	6506.51	10.11	2.72	1.03

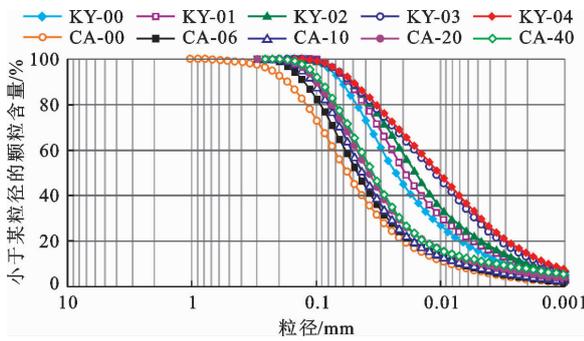


图 1 各试验土样的颗粒级配曲线

2.2 反滤料制备

反滤料的配制按照《水电工程天然建筑材料勘察规程》(NB/T 10235—2019)中的相关要求进行了级配设计^[18]。根据试验方案,采用厚度为 5 cm 的单一反滤形式,反滤料和土工布布置在土样后部,共同起到反滤和保护作用,试验所用土工布单位面积质量为 150 g/m²,渗透系数约为 0.1~0.01 cm/s,纵向和横向断裂强力分别为 5.1 和 5.2 kN/m。反滤料级配曲线见图 2。

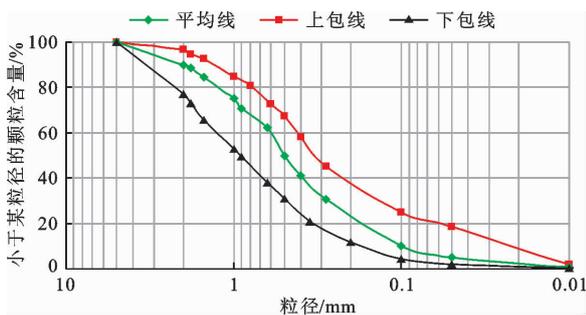


图 2 试验反滤料级配曲线

由于 KY 和 CA 试样的颗粒大小组成不同,因此反滤料的配制要求也有一定的区别。KY 土样反滤料中 0.075 mm 粒径以下颗粒占比为 40%~85%,对应反滤层 $D_{15} \leq 0.7 \text{ mm}$;CA 土样反滤料在 0.075 mm 以下的含量应不低于 85%,其反滤层 $D_{15} \leq 9 d_{85}$,当 $9 d_{85} < 0.2 \text{ mm}$ 时, $D_{15} = 0.2 \text{ mm}$ 。同时,为保证过流畅通,要求为 $D_{15} \geq 4 d_{15}$,且当 $4 d_{15}$ 小于 0.1 mm 时, $D_{15} \geq 0.1 \text{ mm}$ 。(上述符号中, D 和 d 分别表示反滤料和土样的粒径,下标数字表示过筛重量百分数)

3 土体内裂缝冲刷试验

本试验设定的贯穿性裂缝宽度为 2 mm。分别对表 1 中的 10 种土样进行试验。试验装置为自制的内径为 10 cm 的裂缝冲刷仪,为确保清晰观察土样裂缝、反滤层等部位的变化情况,整个试验装置选用透明加厚亚克力板材质,配套加压水头装置采用自制的可升降水箱。裂缝冲刷试验仪器示意图见图 3。

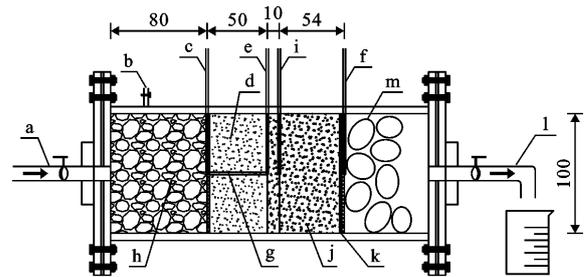


图 3 裂缝冲刷试验仪器示意图(单位:mm)

试验时水平放置冲刷仪,前部为土样,反滤层设在后部,土样前设置缓冲层,在反滤层后放置土工布辅助反滤,并用透水板和压盖卵石在后侧压住土工布,保持一定的压重,以防止在较大的水头作用下反滤层发生位置偏移,该部分主要模拟大坝反滤料后侧支撑土体。

土样的最大干密度控制为 1.72 g/cm^3 ,含水率控制为 18%。制样时,先按要求将 2 mm 厚的成缝板安置在冲刷仪中,将土样倒入成缝板两侧后,分层压实至控制高度,然后在土样后部放置预制好的反滤料,反滤料的干密度控制为设计反滤料平均线所对应的密度。随后抽出成缝板,盖上透水板,为保证裂缝不受干扰,该过程需控制力度,保证接触即可。然后在预制裂缝前和土工布后分别放置粒径为 5 ~ 10 mm 的缓冲碎石和粒径为 20 ~ 25 mm 的压盖卵石以起到缓冲水流和保护作用,最后安装冲刷仪盖板,在预制裂缝前端、裂缝末端、反滤料前部 1 cm 处及反滤层后安装测压管以实时监测水头变化情况并及时记录数据。

装样完成后开始逐级施加水头,第 1 级水头施加后持续不变,每隔 10 ~ 20 min 测记 1 次数据,直到出水口有渗水流出为止,然后升高到第 2 级水头,试验过程中各级水头持续时间约 70 min。每级水头稳定后记录测压管水头及出水量,计算土样裂缝内、反滤料的水力坡降和渗透流速,缝内坡降由预制裂缝前、末端测压管水头差除以预制裂缝宽度(即 50 mm)得到。当水头差超过土样厚度的 50 ~ 100 倍时,结束试验。

4 试验结果与分析

4.1 土体不同分散性对裂缝自愈性的影响

4.1.1 试验开始至出水口有渗水流出阶段 试验开始至出水口有渗水流出阶段不同分散性土样预制裂缝内坡降随时间变化曲线见图 4。从图 4 可以看出,开始阶段预制裂缝形态良好,过流顺利,预制裂缝内的坡降趋近于 0。随着时间的推移,非分散性土样的缝内坡降开始迅速增大。这是由于水流的冲刷作用使裂缝表面较松散的土颗粒塌落,在反滤层的保护作用下,颗粒移动速度减弱,淤积在裂缝内致使缝隙逐渐缩小,缝内坡降上升。对于分散性较高的土样,缝内坡降几乎没有明显变化。这与土颗粒湿化特性相关,水头较低时分散性土颗粒吸水性不强,裂缝表面土颗粒湿化崩解速率较慢,短时间内散落在水中的颗粒较少,无法使裂缝有效愈合,缝内坡

降上升极为缓慢。

由以上分析可知,非分散性土和过渡性土中的土颗粒在短时间内可将裂缝淤堵使其愈合,而分散性土出水时间相对较长,裂缝填充也相对较慢。同时对比 KY 和 CA 试样中的分散性土样试验结果,可知 KY 分散性土样出水时间更长,这是由于 KY 土样颗粒普遍较小,黏粒含量较多,对水流的阻碍作用相对较强,且土体自身渗透性质较差,因此对出水时间有一定的影响。

4.1.2 出水口有渗水流出至试验结束阶段 裂缝冲刷试验结果统计见表 4,由表 4 及试验现象观察发现,KY 和 CA 两组试样的 4 种坡降均随着水头的持续增加而逐渐增大,其中土体裂缝处承担的坡降增长速率较快,说明试验过程中土体和反滤料均为坡降的主要承担者,共同抵抗水头作用,但随着裂缝的愈合,坡降逐渐由土体裂缝处承担。

试验过程中不同分散性土样缝内坡降随累计时间的变化曲线见图 5。从图 5 可以看出,在时间达到 100 min 后土样缝内渗透坡降显著增加,KY-02、KY-03、KY-04 试样的最终缝内坡降分别为 26.27、28.08、31.42,均大于非分散性土样 KY-00 的最终缝内坡降 21.32 和过渡性土样 KY-01 的最终缝内坡降 23.27,CA-10、CA-20、CA-40 试样的最终缝内坡降分别为 22.22、22.80、23.51,均大于非分散性土样 CA-00 的缝内坡降 20.92 和过渡性土样 CA-06 的缝内坡降 21.26,且分散程度越大,则缝内坡降也越大,坡降增长的趋势也越明显,说明在更长的时间内,裂缝愈合情况更好。因此,分散性土相较于非分散性土而言,由于具有冲蚀和分散坍塌两种过程,聚集速度较快,在受到长时间冲刷时,土体中裂缝的自愈性更强。

试验过程中不同分散性土样缝内坡降与流速关系曲线见图 6。从图 6 可以看出,随着水头的增大,非分散性土流速和缝内坡降均增大,但渗透坡降增长过于缓慢,在流速较大时,承担的水头相比分散性大的土样较小,裂缝愈合效果不如分散性土。相比之下,分散性土样流速普遍较小,渗透坡降增长较多,说明在水流持续冲刷作用下,分散性土坍塌量逐渐增大,裂缝内淤堵明显,自愈性表现良好。且土样的分散性越强,则相同缝内坡降时的流速越小,裂缝愈合情况越好。

4.2 土体基本性质对裂缝自愈性的影响

根据裂缝自愈机理可知,分散性土的裂缝自愈性除受到分散程度的影响外,其内部孔隙情况、细小

颗粒的分布状况及碱性程度等土体的基本性质均会影响水流冲刷作用下颗粒的分散。根据表 3 测定的裂缝冲刷试验中 10 组土样的孔隙度、酸碱度、塑性

指数和黏粒含量等基本性质的定量数值,结合土样的最终缝内坡降,可得到各土样主要基本性质对缝内坡降的影响曲线,如图 7 所示。

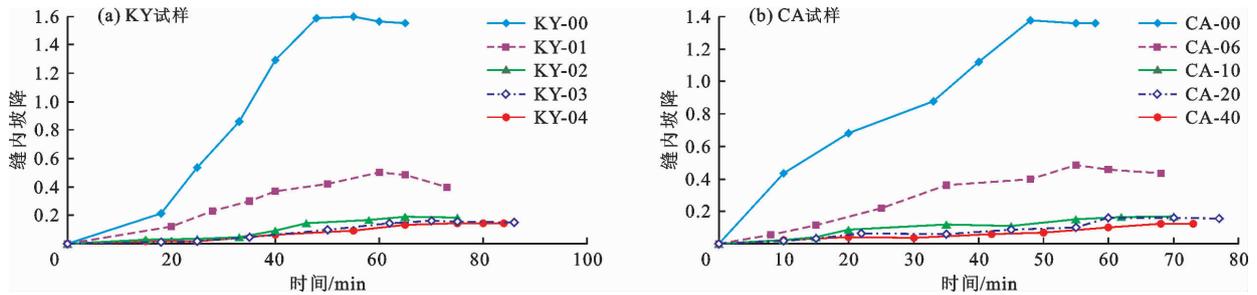


图 4 试验开始至出水口有渗水流出阶段不同分散性土样缝内坡降随时间变化曲线

表 4 裂缝冲刷试验结果统计

土样编号	试验出水口流速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)		缝内坡降		反滤料进口 1 cm 内 的坡降		反滤料进口 1 cm 后 的坡降		整个反滤料承担 的坡降	
	开始	结束	开始	结束	开始	结束	开始	结束	开始	结束
KY-00	0.016	10.248	1.55	21.32	6.75	79.80	0.62	4.82	1.64	17.32
KY-01	0.785	3.015	0.36	23.27	4.40	57.45	0.06	3.62	0.78	12.59
KY-02	0.779	1.059	0.19	26.27	26.60	79.55	0.36	1.19	4.73	14.25
KY-03	0.016	0.353	0.15	28.08	24.10	70.38	0.36	1.14	4.32	12.68
KY-04	0.022	0.286	0.14	29.42	27.87	74.75	0.36	1.32	4.95	13.56
CA-00	0.069	14.531	1.36	20.92	14.50	47.60	0.46	4.66	2.80	11.82
CA-06	1.347	7.150	0.43	21.26	24.70	107.20	0.65	1.60	4.66	19.20
CA-10	0.279	3.157	0.17	22.22	20.98	88.44	0.79	2.17	4.16	16.55
CA-20	0.227	2.963	0.16	22.80	21.70	76.24	0.35	3.08	3.92	15.28
CA-40	0.135	2.397	0.12	23.51	21.00	98.13	0.52	2.24	3.93	18.22

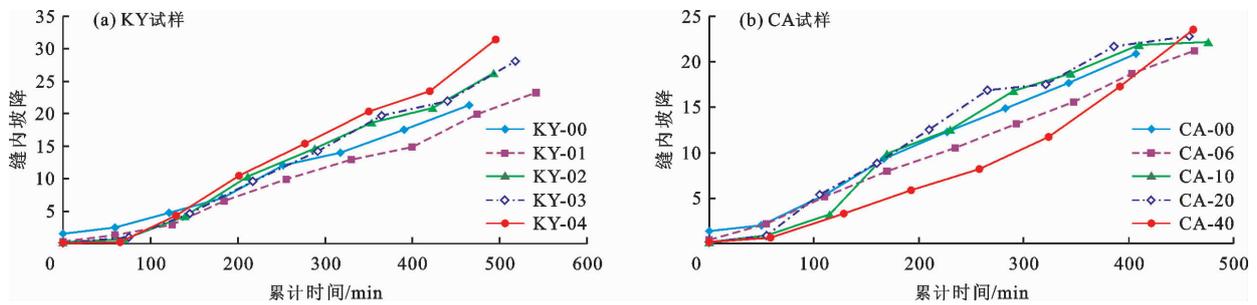


图 5 试验过程中不同分散性土样缝内坡降随累计时间变化曲线

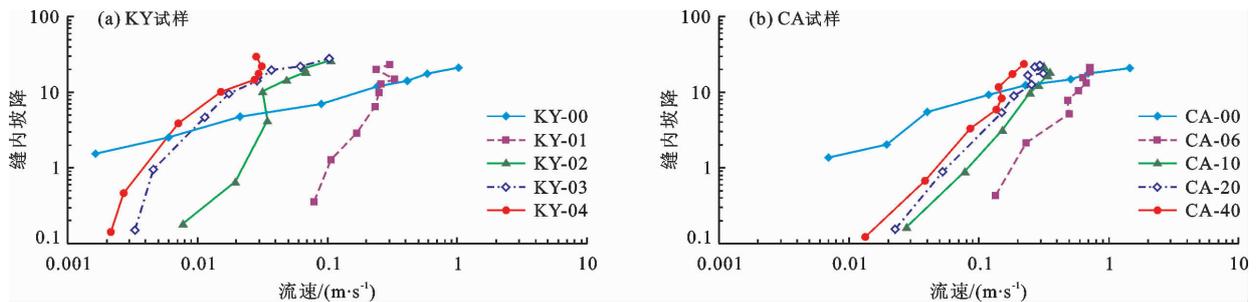


图 6 试验过程中不同分散性土样缝内坡降与流速关系曲线对比

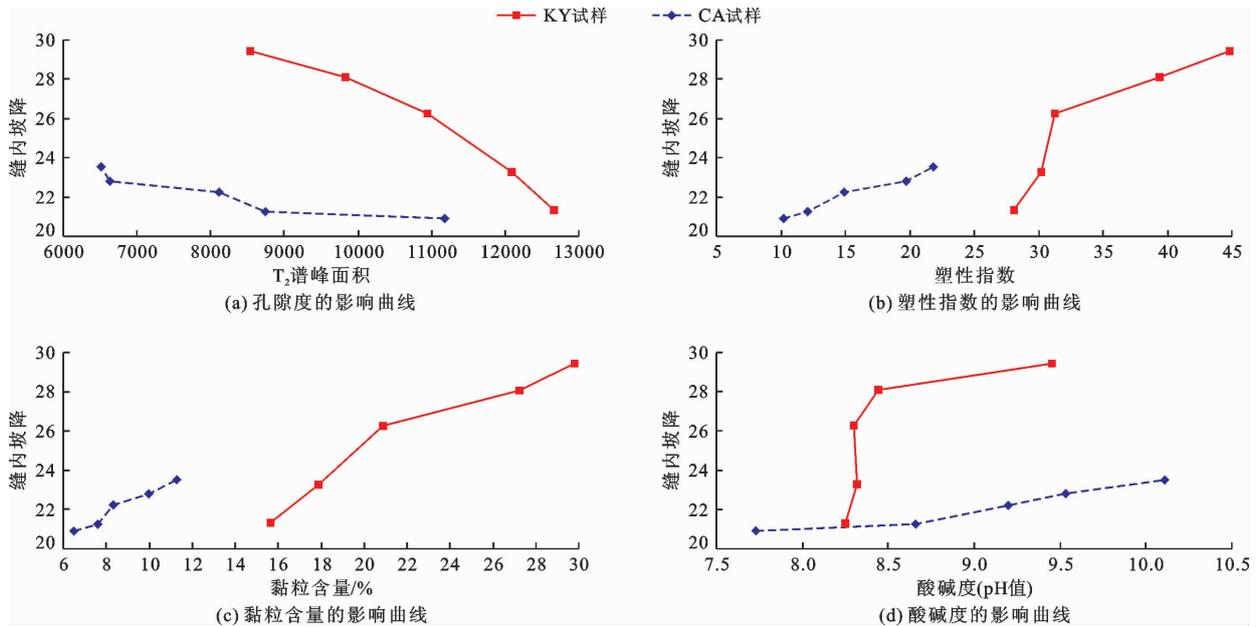


图7 各土样主要基本性质对缝内坡降的影响曲线

从图7可以看出,KY和CA土样的主要基本性质对裂缝自愈性的影响具有基本相同的规律,裂缝自愈性均随着塑性指数的上升、黏粒含量的增多、碱性的增强以及孔隙度的下降而增强。分析各曲线可知,土样基本性质与裂缝自愈指标(缝内坡降)之间仅存在定性关系,无法拟合出合适的函数关系式,这是由于裂缝冲刷过程非常复杂,期间存在大量的物理和化学反应,各个因素相互制约,共同影响着裂缝的最终愈合情况。

根据图7计算得到当KY和CA土样缝内坡降变化(由最小值到最大值)相同时的各基本性质定量数值的相对变化量,对其进行百分化处理得到土样各基本性质对裂缝自愈性的影响强度,见图8。

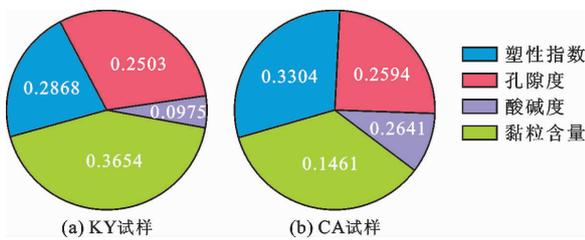
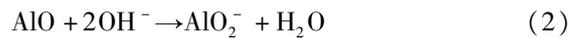


图8 各土样主要基本性质对裂缝自愈性的影响强度

图8中的影响强度所表示的是当缝内坡降变化相同时,土体各基本性质定量数值的相对变化量,体现了土体不同基本性质对裂缝自愈性的影响强度。从图8可以看出,对于KY试样,酸碱度变化幅度最小(0.0975),但造成的缝内坡降变化很大,因此对裂缝内的坡降影响最为显著。其次依次为孔隙度(0.2503)、塑性指数(0.2868)及黏粒含量(0.365

4)等因素。对于CA试样,参数变化时对缝内坡降影响最为显著的仍为酸碱度(0.1461),其次依次为孔隙度(0.2594)、黏粒含量(0.2641)和塑性指数(0.3304)。因此,可认为土颗粒酸碱度对裂缝自愈性的影响较大,而裂缝自愈性受其余土样基本性质影响的敏感程度较弱。

黏粒表面和边缘有羟基和氧化铝,由反应式(1)、(2)可知,随着pH值的升高,即氧化氢离子含量增加,颗粒有效负电荷越大。根据双电层理论和DLVO理论^[20]可知,随着负电荷的增加,双电层厚度增加^[26],颗粒间排斥力增加,从而使黏土颗粒更易分散。由双电层理论可知,黏粒含量越高,则双电层越厚,土的分散性越强,最终裂缝自愈效果越好。因此酸碱度等土的基本性质能够影响分散性土裂缝自愈特性。



4.3 不同反滤料对裂缝自愈性的影响

选用土样编号为KY-04的分散性土样,在控制干密度分别为设计反滤料上包线、平均线和下包线的3种反滤料的保护下,进行了裂缝冲刷试验,探究不同反滤料保护下分散性土的裂缝自愈特性。不同反滤料保护下分散性土样缝内坡降与流速关系曲线见图9。

从图9可以看出,在试验过程中,下包线反滤料保护的土样渗透流速较大,且坡降主要由进口1cm范围内的反滤料承担,缝内坡降持续增长但可承担

的坡降相对较小,最终缝内坡降仅为 20.86。这是因为下包线反滤料颗粒较粗,反滤保护作用相对较差,对渗流几乎无阻碍作用,水流经过裂缝时冲刷表层的土颗粒,由于流速较大,缝内土颗粒随水流冲向反滤料交界处,土颗粒由下游侧向上游侧堆积,逐渐形成了次生土体,但由于整个过程中反滤料受到水流冲刷影响较大,因此防渗作用一般。

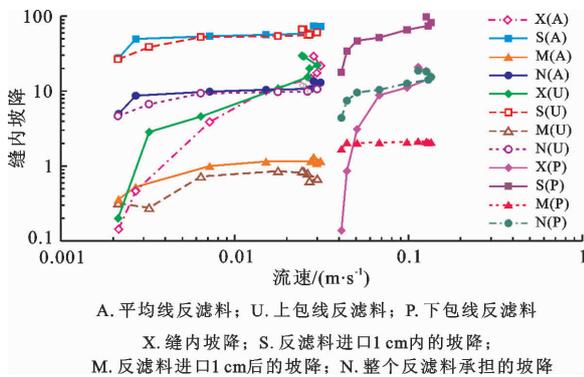


图9 不同反滤料保护下分散性土样缝内坡降与流速关系曲线

相较于下包线反滤料,在上包线及平均线反滤料保护时,最终可达到的缝内坡降分别为 29.80 和 29.43,试样渗透流速相对较小,且在流速达到 0.000 3 cm/s 时流速逐渐减小,这说明在反滤料的保护作用下,分散性土颗粒在裂缝内持续黏结,受到水流干扰较小,此时分散性土持续坍塌,在裂缝处重新堆积粘连,预制裂缝开始自愈。

5 结论

本文以 KY 和 CA 两组不同分散程度的分散性土样为研究对象,通过试验研究了分散性、土体基本性质和反滤料级配对分散性土裂缝自愈性的影响,得出以下结论:

(1) 裂缝冲刷过程中,水头由土体和反滤料共同承担,土体缝内坡降的增长明显,说明在反滤料的保护下,土体部分的预留裂缝逐渐愈合,且土样分散性越强,裂缝愈合情况越好。

(2) 同种反滤料保护时,非分散性土和过渡性土早期裂缝愈合更快,但土样缝内坡降的增长速率逐渐变慢,可承担的坡降上限较小。分散性土随时间持续散落土颗粒,颗粒间重新黏结需要较长时间才能形成新的密实土体使裂缝愈合,但可承担的坡降上限较高,裂缝最终愈合情况较好。

(3) 土体的裂缝自愈性随着塑性指数的上升、黏粒含量的增多、碱性的增强以及孔隙度的下降而增强。但土体基本性质与裂缝自愈指标(缝内坡

降)之间只存在定性关系。在 KY 和 CA 土样的诸多基本性质中,酸碱度对裂缝自愈性影响较为明显,产生相同影响效果时的变化幅度占比仅分别为 0.097 5 和 0.146 1。其余基本性质对裂缝自愈性的影响相对较弱。

(4) 相较于下包线反滤料,上包线和平均线反滤料保护试样时,试样对应时间的渗透流速相对较小,随着反滤料由细变粗,试验可达到的最终缝内坡降分别为 29.80、29.43,说明反滤料的颗粒组成越细小,反滤层的辅助防渗效果越好,裂缝自愈性越强。

参考文献:

- [1] RENGASAMY P, TAVAKKOLI E, MCDONALD G K. Exchangeable cations and clay dispersion: Net dispersive charge, a new concept for dispersive soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(5): 659–665.
- [2] MAHARAJ A, ROOY L V, GREEN P P. Revised test protocols for the identification of dispersive soils [J]. *Journal of the South African Institution of Civil Engineers*, 2015, 57(1): 31–37.
- [3] GIDDAY B G, MITTAL S. Improving the characteristics of dispersive subgrade soils using lime [J]. *Heliyon*, 2020, 6(2): e03384.
- [4] HAN Yan, WANG Qing, XIA Weitong, et al. Experimental study on the hydraulic conductivity of unsaturated dispersive soil with different salinities subjected to freeze–thaw [J]. *Journal of hydrology*, 2020, 583: 124297.
- [5] ABBASLOU H, HADIFARD H, GHANIZADEH A R. Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils [J]. *Heliyon*, 2020, 6(2): e03462.
- [6] 彭文明, 李建, 张延亿, 等. 一种低液限黏土的分散性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(S1): 121–126.
- [7] PREMKUMAR S, PIRATHEEPAN J, ARULRAJAH A, et al. Experimental study on contact erosion failure in pavement embankment with dispersive clay [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(4): 04015179.
- [8] 魏诚寅. 上海地区浅层粉土渗透性与土体各参数的关系 [J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(6): 1714–1718.
- [9] 焦浩然. 应力状态下细粒土的渗透性试验研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [10] 杨德欢, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 细粒迁移及结构变化对黏土渗透性影响的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(11): 2009–2017.
- [11] 苏杰. 台缘裂缝对黄土渗透性和黄土斜坡稳定性的控制规律 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.

(下转第 181 页)

- 术的破碎煤样力学特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 46(S2): 682-691.
- [17] ZHANG Yihuai, LEBEDEV M, AI - YASERI A, et al. Nanoscale rock mechanical property changes in heterogeneous coal after water adsorption[J]. Fuel, 2018, 218: 23-32.
- [18] BENNETT K C, BERLA L A, NIX W D, et al. Instrumented nanoindentation and 3D mechanistic modeling of a shale at multiple scales[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(1): 1-14.
- [19] MILLER M, BOBKO C, VANDAMME M, et al. Surface roughness criteria for cement paste nanoindentation[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(4): 467-476.
- [20] UIM F J, VANDAMME M, BOKBO C, et al. Statistical indentation techniques for hydrated nanocomposites: Concrete, bone, and shale[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 90(9): 2677-2692.
- [21] 徐鼎平,柳秀洋,徐怀胜,等. 深埋花岗岩细观力学特性纳米压痕试验及参数均质化研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2761-2771.
- [22] LUO Shengmin, LU Yunhu, WU Yongkang, et al. Cross-scale characterization of the elasticity of shales: Statistical nanoindentation and data analytics[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2020, 140: 103945.
- [23] WU Jun, LIU Li, DENG Yongfeng, et al. Distinguishing the effects of cementation versus density on the mechanical behavior of cement-based stabilized clays[J]. Construction and Building Materials, 2020, 271: 121571.
- [24] SU Xuexue, TANG Huiming, HUANG Lei, et al. The role of pH in red-stratum mudstone disintegration in the Three Gorges reservoir area, China, and the associated micromechanics[J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105873.
- [25] 曹雪山,额力素,赖喜阳,等. 崩解泥化过程中泥岩强度衰减因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1936-1942.

(上接第 173 页)

- [12] VAKILI A H, KAEDI M, MOKHBERI M, et al. Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application[J]. Applied Clay Science, 2018, 152: 1-8.
- [13] 蒲泉,吴道勇,左双英,等. 不同分散方法对贵阳红黏土分散性的影响机理[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(8): 126-130+136.
- [14] MOHAMMADI M, CHOBBASTI A J. The effect of self-healing process on the strength increase in clay[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018, 32(16): 1750-1772.
- [15] ANDALIB G, HOUSHYAR Y, ROUSHANGAR K. Evaluation of influencing factors in outflow control and self-healing property of clay core (case study: Vanyar dam - Iran) [J]. Advance Researches in Civil Engineering, 2021, 3(2): 55-71.
- [16] ROUSHANGAR K, ALAMI M T, HOUSHYAR Y. Experimental investigation of self-healing phenomenon of clay in earth dams and its influencing factors[J]. Water and Soil Science, 2019, 29(1): 15-25.
- [17] ROUSHANGAR K, ALAMI M T, HOUSHYAR Y. Experimental investigation of bentonite impact on self-healing of clay soils[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(21): 1122.
- [18] 党进谦,马晓婷,孙仲林,等. 分散性对心墙土料裂缝冲刷影响的试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1103-1107.
- [19] DANCHENKO Y, ANDRONOV V, SOPOV V, et al. Acid-basic surface properties of clay disperse fillers[C]// MATEC Web of Conferences, Kharkiv, Ukraine: 2018.
- [20] 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.
- [21] 国家能源局. 水电工程天然建筑材料勘察规程: NB/T 10235—2019 [S]. 北京:中国水利水电出版社, 2020.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京:中国计划出版社, 2019.
- [23] 王中妮,樊恒辉,贺智强,等. 分散性土改性剂对土的分散性和抗拉强度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 425-432.
- [24] 张路,杨秀娟,樊恒辉,等. 土样分散性综合判别方法的对比研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(4): 88-100.
- [25] The American Society for Testing and Material. Standard test methods for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test D4647/D4647M - 13 (2020) [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2020.
- [26] 高策,杨秀娟,邱维钊,等. 仿岩溶碳酸氢钙改性分散性土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1565-1572.