

水泥+石灰复合改性膨胀土对水质的影响

吴建涛¹, 伍洋¹, 金科羽², 李国维¹, 陈承谦¹, 米帅奇¹, 郭笑彤¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 对引江济淮试验工程弱膨胀土进行石灰改性、水泥改性、水泥+石灰复合改性, 并制作三轴试样进行不同龄期(1 d、3 d、7 d、28 d)的养护, 各龄期试样取出浸泡并分别在第1天、第3天、第7天、第28天提取浸出液检测其pH与Ca⁺含量等, 比较复合改性土浸出液与石灰改性、水泥改性土浸出液水质差别, 并观察改性土三轴试样的浸水后完整性, 探究复合改性能否降低土体对水质的影响。结果表明: 复合改性土三轴试样浸出液的pH与Ca⁺含量明显低于石灰改性土三轴试样浸出液; 养护龄期为28 d的复合改性土对水质的影响也要低于水泥改性土。在实际工程中, 应保障至少28 d的养护时间, 并且在养护过程中杜绝浸泡或流水冲刷, 保证养护质量。

关键词: 引江济淮; 膨胀土; 复合改性; 石灰改性; 浸出液; 水质

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2019)06-0082-06

Effects of cement-lime compound modification of expansive soil on water quality//WU Jiantao¹, WU Yang¹, JIN Keyu², LI Guowei¹, CHEN Chengqian¹, MI Shuaiqi¹, GUO Xiaotong¹ (1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to study the effects of cement-lime compound modification of expansive soil on water quality, expansive soil samples were taken from the Project of Water Diversion from the Yangtze to Huaihe River which were modified by cement, lime, and cement-lime. The triaxial specimens were fabricated and conditioned for different ages (1 d, 3 d, 7 d, 28 d). The specimens with different curing ages were immersed in water for 1 d, 3 d, 7 d, 28 d, after which the leaching solution was taken and subjected to pH value and Ca⁺ content tests. By comparing the leaching solution testing results and observing the integrity of the specimens after immersion, whether compound modification can reduce the soil impact on water quality was explored. It is found that the pH value and Ca⁺ content of the leaching solution from compound modified soil samples are lower than that of lime modified samples, and the compound modified soil with 28 d curing age has less effect on water quality than that of cement modified soil. In addition, it is suggested a curing age of at least 28 d should be guaranteed in practical engineering, during which rain wash or long-time water soaking should be avoided to ensure the curing quality.

Key words: Water Diversion Project from the Yangtze to Huaihe River; expansive soil; compound modification; lime treatment; leaching solution; water quality

膨胀土是一种吸水膨胀软化、失水收缩开裂, 并能反复发生湿胀干缩变形的特殊黏土, 是在长期自然地质历史作用过程中形成的强亲水性矿物地质体^[1]。边坡膨胀土多为非饱和土, 土中水分通过地表蒸发, 经过干湿循环后易在浅部产生干缩裂隙^[2-3]。裂隙的出现破坏了土体的完整性, 在形成较大滑动面后, 伴随着降雨等自然现象, 容易发生滑坡, 使整个工程无法正常发挥作用^[4-5]。

引江济淮是一项以生活供水、船舶通航、农业灌溉为主, 以改善巢湖^[6]、淮河^[7]等水生态环境为辅的大型水利渠道工程。该工程全线输水总长

1 048.68 km, 膨胀土渠段 55.4 km, 从长江安徽段起向北流经巢湖后汇入淮河流域^[8-9]。引江济淮试验工程(桩号 40+700~42+200)位于安徽省合肥市蜀山区, 地貌单元为江淮丘陵区, 地面起伏较大, 膨胀土以弱、中膨胀潜势为主^[10]。

为防止膨胀土对渠道边坡造成破坏, 工程上多通过石灰改性、水泥改性或在边坡处设置锚杆对膨胀进行处理^[11-12], 并需要加强对膨胀土力学性质的监测^[13]。石灰或水泥改性是在膨胀土中均匀地掺入一定量的石灰或水泥, 使其与黏土中的亲水矿物进行反应, 生成凝胶物质, 降低亲水矿物的含量, 从

而提高土体的黏结性与稳定性^[14-15]。水泥改性土具有初凝时间短、抗剪强度高^[16]、沿坡面变形较均匀^[17]以及浸水后完整性显著提高的特点。但是,改性膨胀土容易因掺拌不均匀而出现改性程度不够彻底的情况,因此实际工程中需要解决掺拌均匀性的问题。我国江淮地区潮湿多雨,黏土的天然含水率普遍较高,难以破碎,若直接掺入水泥进行改性,水泥无法完全与土体发生反应,从而导致拌和不均匀,影响改性效果。因此,为了保证膨胀土水泥改性效果及工程质量,掺入水泥前土料需要进行翻晒,但是膨胀土受天气影响较大,水分蒸发速率较慢,最终导致工程进度的延迟以及施工成本的增加。另一方面,石灰资源丰富、成本较低,且已有研究表明,用生石灰改良膨胀土可以迅速降低土体的含水率与膨胀率,使土体的干密度降低,渗透系数增加^[11,18]。但将石灰改性土运用于对防渗有较高要求的渠道工程时容易引起渠道水及雨水的渗透,难以起到防渗作用^[19]。另外,石灰中的 Ca^+ 、 Mg^{2+} 会随着水流进入河道,引起水质硬化,从而影响人的健康。硬化的水体结构通常缺乏生态功能,自净能力变弱,水质难以保证;同时由于循环水系直接与大气接触,使细菌、藻类繁殖,造成水质恶化与水生态环境崩溃^[20-21]。

为解决石灰改性导致的水质问题以及水泥的掺拌均匀性问题,本文拟采用水泥+石灰复合改性方法对膨胀土进行处理。掺入石灰既可对土体进行初步改性,又可降低土体的含水率,方便拌和。本文通过在石灰改性土中掺入一定量水泥,探究水泥的存在能否抑制石灰改性土中阳离子的浸出,以及不同掺量的石灰、水泥对离子浸出量的影响,并观察以上不同改性土三轴试样的浸水后完整性。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

土样取自合肥引江济淮试验工程中区坑二级坡坡中,距地表约 7 m。土样的基本物理参数如下:干密度为 1.95 g/cm^3 ,含水率为 18.6%~24.0%,土粒的相对密度为 2.59,液限为 51.2%,塑限为 21.6%,自由膨胀率为 51.5%,最优含水率为 15%。根据 GBJ112—1987《膨胀土地区建筑技术规范》^[22],该土样属于弱膨胀土。

水泥为普通硅酸盐水泥,型号为 P. C42.5,标准稠度用水量一般在 21%~28% 之间,初凝时间为 4 h。石灰为 JC/T 480 建筑生石灰粉。浸泡浸出液时所用的水为合肥市普通自来水。

1.2 试验方案

风干引江济淮试验工程边坡代表性膨胀土,然

后分层过 20 mm、10 mm、5 mm、2.5 mm 筛,按照 10~20 mm(质量分数为 50%,下同)、5~10 mm(25%)、2.5~5 mm(25%)的级配配制待改性土样。对配置好的土样进行 2% 石灰、4% 石灰、2% 水泥改性和 2% 水泥+2% 石灰复合、4% 水泥+4% 石灰复合改性。

取出部分改性土进行不同含水率(11%、12%、13%、14%、15%)配置,并进行重型击实试验,得到各改性土的最大干密度,并测得各改性土最大干密度对应的最优含水率均为 13%。

将改性土按 SL237—1999《土工试验规程》^[23]各制作 4 个三轴试样,制样干密度按最大干密度和压实度 93% 计算获得。将改性土三轴试样和各类未击实改性土做好标记,用塑料薄膜密封共同置于 25℃ 恒温条件下养护不同时间(1 d、3 d、7 d、28 d)。在各养护期,每种改性土取出一个三轴试样,按照试样与水质量 1:10 的比例放入水中浸泡,浸泡过程中对容器进行密封处理。浸泡不同时间后(1 d、3 d、7 d、28 d)提取并过滤 50 mL 改性土三轴试样浸出液,对其进行 pH 检测与 Ca^+ 的滴定试验,并在浸水过程中观察试样的完整性。浸出液 pH 采用梅特勒酸度计进行测试; Ca^+ 含量的检测:根据标准试验采用 0.1 mol/L 的 EDTA-二钠(乙二胺四乙酸二钠)滴定法进行 Ca^+ 含量的滴定。当加入钙红指示剂的溶液由紫红色变为蓝色时滴定结束,记录此时滴定管中 EDTA 标准溶液消耗体积。

考虑到对膨胀土进行复合改性时,需要将石灰与原膨胀土拌和闷料 3 d 进行沙化,以提高水泥与膨胀土的拌和均匀性。在掺入水泥后再养护 1 d,复合改性土前后共需要 4 d 的养护时间,因此复合改性与石灰、水泥单独改性在较短的养护龄期内,其自由膨胀率结果不具有可比性。综上分析,试验选用养护 28 d 后的未击实改性土,按 SL237—1999《土工试验规程》^[23]和 JTJ051—1993《公路土工试验规程》^[24]进行自由膨胀率试验,比较分析不同方法的改性效果。

2 试验结果及分析

2.1 改性膨胀土的自由膨胀率测试

各未击实改性土养护 28 d 后进行自由膨胀率试验。2% 石灰改性、4% 石灰改性、2% 水泥改性和 2% 水泥+2% 石灰复合改性、4% 水泥+4% 石灰复合改性的自由膨胀率分别为 31%、30%、29%、30%、28%。不同改性土养护 28 d 后的自由膨胀率均在 30% 左右,都达到了预期改性效果。其中 4% 水泥+4% 石灰复合改性的自由膨胀率最低,但 5 种改性膨胀土的自由膨胀率均处于同一水平,并且石灰、水泥的材料差异以及不同改性剂的掺量、配比对膨胀土

的改性效果影响不大。造成这一现象的主要原因是研究配制待改性土样的土颗粒较小,各掺量的改性剂与土颗粒能均匀混合,能最大限度地发挥各改性剂的改性效果。

2.2 改性土三轴试样浸出液水质检测结果

表1 为各改性土三轴试样浸出液的 pH 测试结果。由表1 可知,每种试样浸水后,浸出液的 pH 均随着浸泡时间的增加而增大。养护龄期、改性方法以及浸泡时间对浸出液 pH 均有影响,其中不同方法改性土三轴试样在相同养护龄期下,浸出液 pH 随着浸泡时间的增加而增大。在相同的浸泡时间下,浸出液 pH 随着养护龄期的增加而减小。当改性方法相同时,改性剂的掺量越高,浸出液在相同条件下的 pH 越大。

表1 改性土三轴试样浸出液 pH

养护龄期/d	改性方法	不同浸泡时间后 pH			
		1 d	3 d	7 d	28 d
1	2% 石灰	8.5	8.8	9.1	9.3
	4% 石灰	8.8	8.9	9.3	9.7
	2%+2% 复合	8.2	8.3	8.5	8.9
	4%+4% 复合	8.5	8.7	9.0	9.4
	2% 水泥	8.0	8.1	8.2	8.4
3	2% 石灰	8.4	8.6	9.0	9.4
	4% 石灰	8.6	8.7	9.3	9.5
	2%+2% 复合	8.1	8.3	8.6	8.8
	4%+4% 复合	8.3	8.6	8.7	9.1
	2% 水泥	8.1	8.2	8.2	8.4
7	2% 石灰	8.4	8.6	9.0	9.4
	4% 石灰	8.6	8.7	9.3	9.5
	2%+2% 复合	8.1	8.3	8.6	8.8
	4%+4% 复合	8.3	8.4	8.9	9.2
	2% 水泥	8.1	8.2	8.4	8.5
28	2% 石灰	8.2	8.7	9.2	9.5
	4% 石灰	8.6	9.0	9.4	9.8
	2%+2% 复合	8.0	8.3	8.7	8.8
	4%+4% 复合	8.1	8.4	8.7	8.9
	2% 水泥	8.0	8.1	8.3	8.4

由表2 可知,试样养护龄期、浸泡时间、改性剂掺量均会影响 Ca⁺析出量。不同改性土三轴试样浸出液中的 Ca⁺含量均随着浸泡时间的增加而不断增加;浸泡时间相同的情况下,改性土三轴试样的养护龄期越长,试样浸水后析出的 Ca⁺数量越少;改性剂的掺量越高,浸出液中的 Ca⁺含量越高。

2.3 复合改性土三轴试样浸出液水质分析

在试样的养护龄期与浸泡时间一致的条件下,比较石灰改性、水泥改性与复合改性3 种改性土三轴试样浸出液 pH 与 Ca⁺含量的区别。

2.3.1 浸出液 pH

图1 为2%石灰、4%石灰、2%水泥+2%石灰、4%水泥+4%石灰、2%水泥等5 种改性土三轴试样

表2 改性土三轴试样浸出液 EDTA 消耗体积

养护龄期/d	改性方法	不同浸泡时间 EDTA 消耗体积/mL			
		1 d	3 d	7 d	28 d
1	2% 石灰	2.1	2.3	2.5	2.7
	4% 石灰	2.3	2.4	2.6	2.8
	2%+2% 复合	1.8	1.9	2.2	2.3
	4%+4% 复合	2.0	2.2	2.3	2.5
	2% 水泥	1.6	1.7	1.9	2.0
3	2% 石灰	2.0	2.2	2.5	2.8
	4% 石灰	2.0	2.4	2.7	3.0
	2%+2% 复合	1.7	2.0	2.2	2.2
	4%+4% 复合	1.9	2.1	2.4	2.6
	2% 水泥	1.6	1.7	1.7	2.0
7	2% 石灰	2.0	2.2	2.6	3.0
	4% 石灰	2.2	2.4	2.7	3.0
	2%+2% 复合	1.5	1.5	1.7	2.0
	4%+4% 复合	1.7	1.8	2.2	2.5
	2% 水泥	1.6	1.7	1.7	2.0
28	2% 石灰	2.0	2.2	2.6	3.0
	4% 石灰	2.2	2.4	2.7	3.0
	2%+2% 复合	1.5	1.5	1.7	2.0
	4%+4% 复合	1.7	1.8	2.2	2.5
	2% 水泥	1.7	1.8	1.9	2.2

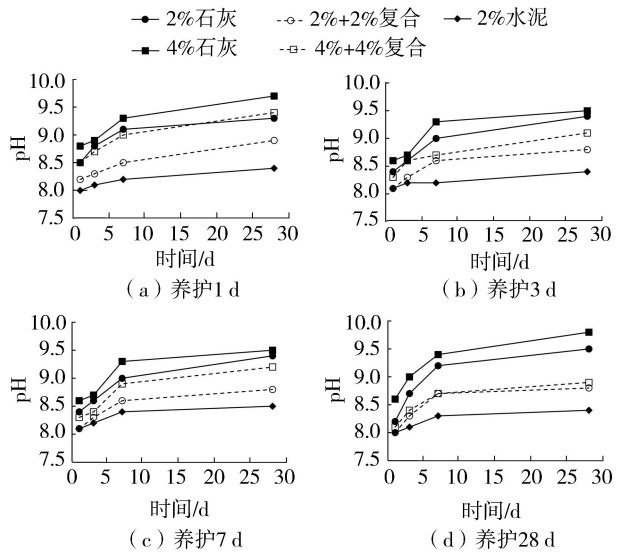


图1 改性土三轴试样浸出液 pH

在相同的养护天数下浸出液的 pH。

图1(a) 为5 种改性土三轴试样在养护龄期为1 d 的 pH。由图1(a) 可知,每种改性土三轴试样浸出液的 pH 均随着浸泡时间的增加而增大,当浸泡时间达到28 d 时最大。2% 水泥+2% 石灰复合改性土三轴试样浸出液的 pH 在相同的浸泡时间下均小于2% 石灰改性土三轴试样浸出液。同样的,4% 水泥+4% 石灰复合改性土三轴试样浸出液 pH 在相同的条件下也小于4% 石灰改性土三轴试样浸出液,且均具有明显的差距。水泥改性土三轴试样浸出液 pH 在仅浸泡1 d 时为所有试样中最小的,并且随着浸泡时间的增加,pH 增加的幅度也较小,对水质影响也相对较小。

图1(b) 为养护龄期到3 d 时各试样浸出液的

pH。在养护龄期与浸泡时间相同的条件下,复合改性土三轴试样浸水后浸出液的 pH 远低于石灰掺量相同的石灰改性土,水泥的掺入有效地降低石灰改性土对浸出液 pH 的影响。水泥改性土三轴试样对浸出液 pH 的影响依旧最小,2% 石灰改性土三轴试样浸出液 pH 在刚浸入水中至 28 d 内始终保持着较高的水平,与 2% 水泥改性土浸出液的 pH 差值巨大。综上,水泥的掺入极大降低了浸出液的 pH。

图 1(c)(d) 分别为养护龄期 7 d、28 d 时各试样浸出液 pH。水泥改性土三轴试样在 5 种试样中,对浸出液 pH 影响最小,石灰改性土三轴试样土浸水后浸出液的 pH 在浸泡时间相同的条件下,始终保持着较高的水平,复合改性土三轴试样极为有效地降低了试样浸出液的 pH。

根据图 1 可知,当浸泡时间达到 7 d 时,不同改性土三轴试样浸出液的 pH 相较于初始浸泡时有较大幅度的增长,并且增长速率较快;当浸泡时间达到 28 d 时,不同改性土三轴试样浸出液的 pH 变化曲线开始收敛,虽然浸出液 pH 仍有较小幅度的增长,但增长速率较慢。特别是水泥改性土三轴试样和复合改性土三轴试样,当养护龄期达到 7 d 后,在浸泡时间达到 28 d 时其浸出液 pH 几乎不再增长。

2.3.2 复合改性土三轴试样浸出液 Ca⁺含量

图 2 为试样浸出液 Ca⁺滴定时消耗的 EDTA-二钠标准溶液的体积。当试样的养护天数为 1 d 时,石灰改性土三轴试样浸水后析出 Ca⁺滴定时消耗的 EDTA-二钠标准溶液的体积最多,Ca⁺含量最大。水泥改性土三轴试样浸水后析出的 Ca⁺最少,掺入水泥的复合改性土三轴试样浸水后析出 Ca⁺的总量明显降低,整体略高于水泥改性土浸出液,可见水泥可以抑制石灰改性土浸水后 Ca⁺的析出。

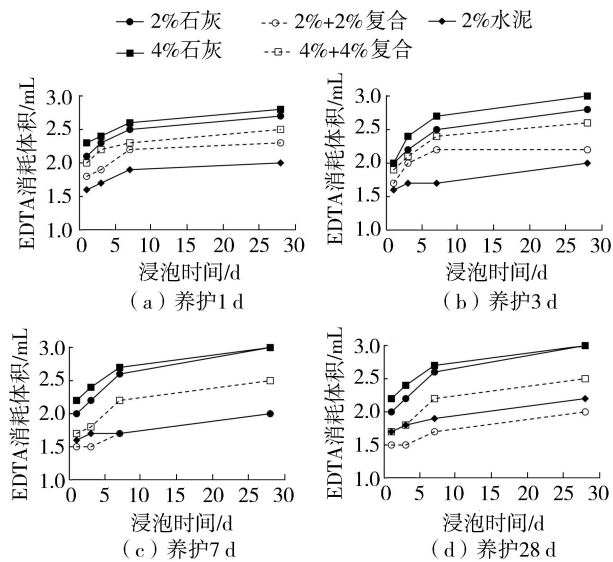


图 2 改性土三轴试样浸出液 EDTA 消耗体积

图 2(b) 为养护龄期为 3 d 的试样浸水后浸出液 Ca⁺滴定时消耗的 EDTA-二钠标准溶液的体积。水泥改性土三轴试样始终保持着较低的 Ca⁺析出量。复合改性土三轴试样析出 Ca⁺的量明显低于具有相同掺量的石灰改性土三轴试样,可见水泥对 Ca⁺的析出具有较强的抑制作用,2% 水泥+2% 石灰复合改性土三轴试样析出 Ca⁺的量整体仍高于水泥改性土三轴试样浸出液。

图 2(c) 为养护龄期 7 d 的试样浸水后浸出液 Ca⁺滴定时消耗的 EDTA-二钠标准溶液的体积,由图可知 2% 水泥+2% 石灰复合改性土三轴试样在初始浸泡的 1 ~ 3 d 内所析出 Ca⁺的量低于水泥改性土所析出的 Ca⁺,但随着浸泡时间的不断增加,Ca⁺析出量逐渐超过水泥改性土三轴试样。

当试样养护龄期增加至 28 d 时,2% 水泥+2% 石灰复合改性土三轴试样浸水后所析出的 Ca⁺含量在相同浸泡时间内均小于水泥改性土三轴试样。由此可见,复合改性土养护 28 d 后再运用于实际工程中,能在保证浸水后完整性的条件下减小 Ca⁺的析出量。

与 pH 相同,在改性土三轴试样初始浸泡的 1 ~ 7 d 内,改性土三轴试样浸出液的 Ca⁺含量在短期内有较大幅度的增长;当浸泡时间达到 7 ~ 28 d 时,EDTA 消耗体积变化曲线逐渐收敛,改性土三轴试样浸出液 Ca⁺含量虽仍有一定程度的增长,但是增长速率明显减慢。

2.4 不同养护龄期试样浸水后完整性

图 3 分别为 2% 水泥+2% 石灰复合改性土三轴试样在养护龄期分别为 1 d、3 d、7 d、28 d 时浸水 1 d 试样形状

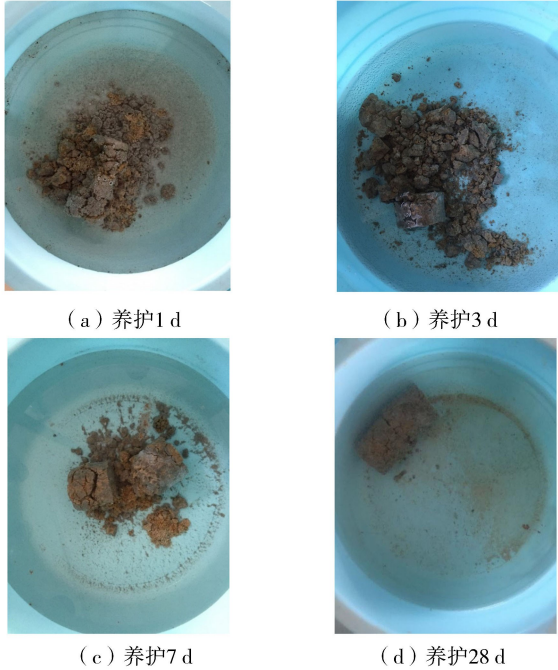


图 3 不同养护龄期 2% 水泥+2% 复合改性土三轴试样浸水 1 d 试样形状

时的试样形状。由图3可知,养护龄期仅为1d的复合改性三轴土试样浸水1d时,试样发生了较大程度的崩解,最外部发生了不同程度的剥落,崩解的颗粒较小,周围包裹着一层水泥。当养护龄期增加至3d时,浸水后试样的崩解程度略小于养护龄期为1d的试样,部分保持了浸泡前的形状,崩解的颗粒变大,周围包裹的水泥明显减少。当养护龄期继续增加至7d时,试样的完整性较之前进一步增强,仅在试样的中间段发生了一定程度的崩解,但未崩解的部分也产生了较大裂痕。当养护龄期到达28d时,试样浸水1d后仍保持完整的形状,并未发生崩解,具有较强的浸水后完整性。因此,复合改性土三轴试样的养护龄期增加时,试样的浸水后完整性也随之增强。

通过对不同养护龄期试样浸出液的pH、 Ca^{+} 析出量以及浸水后完整性分析可知,石灰改性土三轴试样在刚浸入水中时,对水质的影响程度随着养护龄期的增加而降低,但当浸泡时间增加时,石灰改性土三轴试样对水质的影响程度反而随着养护龄期的增加而增加。水泥改性土三轴试样具有着较为稳定的性质,其浸水后的pH、 Ca^{+} 析出量并未随着养护龄期的增加而出现较大变化。复合改性土三轴试样在相同的浸泡时间下,养护龄期越高,试样浸水后对水质的影响越小。石灰改性与复合改性土三轴试样的浸水稳定性均随着养护龄期的增加而增强。因此,当复合改性土运用于实际工程中时,对改性土进行28d养护并防止其与水分的接触是极其必要的。

3 结 论

a. 复合改性土在养护28d后,自由膨胀率均降至30%左右,满足自由膨胀率的改性要求。

b. 改性剂的掺量对于试样浸水后的水质也具有重要的影响作用,改性剂的掺量越高,改性土三轴试样浸水后浸出液的pH与 Ca^{+} 含量也越高,虽然试样浸水后完整性也有一定的增强,但考虑到尽可能降低对水质的影响,当改性土运用于实际工程中时,尽可能采用较小掺量改性剂的改性土。对于改性土三轴试样浸泡28d以后的水体性质变化还需进一步试验研究。

c. 改性土三轴试样的养护龄期对于试样的性质具有极为重要的影响,试样的养护龄期越长,浸水后的形状越完整。复合改性试样浸水后析出的 Ca^{+} 含量随着养护龄期的增加而不断降低,所以在实际工程中,建议增加改性土的养护龄期至28d,并且在养护龄期内应当杜绝浸泡或流水冲刷,这样既可以保证改性土的浸水后完整性,又可以降低复合改

土对水质的影响。

d. 水泥的掺入不仅可以降低石灰改性土浸出液的pH,抑制 Ca^{+} 的析出,并且能够降低复合改性土中 Ca^{+} 的析出速率,增强土体的稳定性。复合改性有效解决了水泥改性在实际工程中掺拌的均匀性问题以及石灰改性对水质的影响和浸水后完整性问题,相对经济与节约,在膨胀土渠道边坡工程中具有运用可行性。

参考文献:

- [1] 杨俊,童磊,张国栋,等.干湿循环机制下风化砂改良膨胀土的收缩特性[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):150-155. (YANG Jun, TONG Lei, ZHANG Guodong, et al. Shrinkage characteristics of expansive soil improved with weathered sand through wet-dry cycles[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43 (2): 150-155. (in Chinese))
- [2] 姚海林,郑少河,陈守义.考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2001,23(5):606-609. (YAO Hailin, ZHENG Shaohe, CHEN Shouyi. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23 (5): 606-609. (in Chinese))
- [3] 吴碧华,袁俊平,杨松.基于滤纸法的裂隙膨胀土土水特征曲线试验[J].水利水电科技进展,2013,33(5):61-64. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song. Experimental study on SWCC of expansive soil with cracks using filter paper method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (5): 61-64. (in Chinese))
- [4] 卢再华,陈正汉,曹继东.原状膨胀土的强度变形特征及其本构特征研究[J].岩土力学,2001,22(3):339-342. (LU Zaihua, CHEN Zhenghan, CAO Jidong. A study on the strength and deformation characteristics and the constitutive model of natural expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22 (3): 339-342. (in Chinese))
- [5] 易顺民,黎志恒,张延中.膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J].岩土工程学报,1999,21(3):294-298. (YI Shunmin, LI Zhiheng, ZHANG Yanzhong. The fractal characteristics of fractures in expansion soil and its significance [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21 (3): 294-298. (in Chinese))
- [6] 朱青,唐红兵.创新湖泊治理与保护思路 加快巢湖治理与保护进程[J].水资源保护,2013,29(4):54-55. (ZHU Qing, TANG Hongbing. Innovation of lake management and protection strategies and acceleration of Chaohu Lake, s management and protection progress [J]. Water Resources Protection, 2013, 29 (4): 54-55. (in Chinese))

- [7] 魏卿,薛联青,张敏,等.淮河流域环境流变化及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响[J].水资源保护,2019,35(4):89-94. (WEI Qing, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Changes of environmental flow in Huaihe River Basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (4) : 89-94. (in Chinese))
- [8] 耿宏斌.引江济淮工程膨胀岩特点浅析[J].资源与环境工程,2016,30(3):471-473. (GENG Hongbin. Research on characteristics of swelling rock for the diversion of water from Yangtze River to Huaihe River Project[J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(3):471-473. (in Chinese))
- [9] 梁后兵.引江济淮工程主要地质影响分析及处理[J].江淮水利科技,2016(4):17-19. (LIANG Houbing. Analysis and treatment of main geological impacts of the Yangtze River and Huaihe River Project [J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology, 2016 (4) : 17-19. (in Chinese))
- [10] 訾洪利.引江济淮工程膨胀土(崩解岩)试验研究[J].江淮水利科技,2017(5):40-41. (ZI Hongli. Experimental study on expansive soil (disintegration rock) of the Yangtze River and Huaihe River Project [J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology, 2017 (5) : 40-41. (in Chinese))
- [11] 张宛林,张绍东,顾凯,等.膨胀土掺石灰对土的工程特性影响机制探讨[J].工程地质学报,1999(4):372-374. (ZHANG Wanlin, ZHANG Shaodong, GU Kai, et al. Discussion on the mechanism of effect of expansive soil mixed with lime on engineering properties of soil mass [J]. Journal of Engineering Geology, 1999 (4) : 372-374. (in Chinese))
- [12] 陈圣刚,于威,李国维,等.引江济淮试验工程河道边坡锚杆检测对比试验[J].水利水电科技进展,2017,37(6):69-75. (CHEN Shenggang, YU Wei, LI Guowei, et al. A comparative study on different testing methods for canal slope reinforcement bars in the water diversion experimental project from Yangtze to Huaihe River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (6) : 69-75. (in Chinese))
- [13] 徐洪钟,孙义杰,权政,等.膨胀土-光纤界面力学性质试验[J].水利水电科技进展,2018,38(5):48-52. (XU Hongzhong, SUN Yijie, QUAN Zheng, et al. Experimental study on mechanical properties of interface between expansive soil and optical fiber [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (5) : 48-52. (in Chinese))
- [14] 李治平.水泥稳定膨胀土的试验研究[J].内蒙古公路与运输,2002(2):4-5. (LI Zhiping. Experimental study on cement stabilized expansive soil [J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2002 (2) : 4-5. (in Chinese))
- [15] 赵旭荣,侯天顺,王红波.膨胀土改良方法探讨[J].路基工程,2008(1):95-96. (ZHAO Xurong, HOU Tianshun, WANG Hongbo. Discussion on the improvement method of expansive soil [J]. Subgrade Engineering, 2008 (1) : 95-96. (in Chinese))
- [16] 杨俊,童磊,张国栋,等.初始含水率和改良材料掺量对膨胀土抗剪强度的影响[J].水利水电科技进展,2014,34(3):39-43. (YANG Jun, TONG Lei, ZHANG Guodong, et al. Effect of initial moisture content and improved material amount on shear strength of expansive soil [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (3) : 39-43. (in Chinese))
- [17] 袁俊平,韩春雷,丁巍,等.膨胀土边坡防护方案比选研究[J].水利水电科技进展,2017,37(1):68-72. (YUAN Junping, HAN Chunlei, DING Wei, et al. Comparison study of four protection schemes for expansive soil slope [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (1) : 68-72. (in Chinese))
- [18] 陈剑雄,李鸿芳,陈寒斌.石灰石粉超高强高性能混凝土性能研究[J].施工技术,2005,34(4):27-28. (CHEN Jianxiong, LI Hongfang, CHEN Hanbin. Study of performances of lime stone ultra-high-strength high performance concrete [J]. Construction Technology, 2005, 34 (4) : 27-28. (in Chinese))
- [19] 乔志刚,王德海,杜振芳,等.改良膨胀土工程性质的新材料[J].科技信息,2006(5):45-46. (QIAO Zhigang, WANG Dehai, DU Zhenfang, et al. New materials for improving the engineering properties of expansive soil [J]. Science & Technology Information, 2006 (5) : 45-46. (in Chinese))
- [20] 韩凤娟,徐海燕.无机盐类在土壤稳定中的应用[J].大连大学学报,1997(2):109-113. (HAN Fengjuan, XU Haiyan. Application of inorganic chemistry salts for soil stabilizing [J]. Journal of Dalian University, 1997 (2) : 109-113. (in Chinese))
- [21] 赵钟楠,张越,黄火键,等.基于问题导向的水生态文明概念与内涵[J].水资源保护,2019,35(3):84-88. (ZHAO Zhongnan, ZHANG Yue, HUANG Huojian, et al. Concept and connotation of aquatic ecological civilization based on problem orientation [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (3) : 84-88. (in Chinese))
- [22] 中华人民共和国城乡建设环境保护部.膨胀土地区建筑技术规范:GBJ112—1987[S].北京:中国计划出版社,1989.
- [23] 中华人民共和国水利部.土工试验规程:SL237—1999[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [24] 中华人民共和国交通部.公路土工试验规程:JTJ051—1993[S].交通部公路科学研究所,人民交通出版社,1993.

(收稿日期:2018-11-26 编辑:刘晓艳)