

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.031

# 干湿循环下水泥改性膨胀土裂隙及渗透特性研究

鲍桂勇<sup>1</sup>,许杨少君<sup>1</sup>,蒋植洁<sup>2</sup>,容洪流<sup>1,3,4\*</sup>,王金龙<sup>2</sup>

(1.广西大学土木建筑工程学院,广西南宁 530004;2.广西长长路桥建设有限公司,广西南宁 530000;3.工程防灾与结构安全教育部重点实验室,广西南宁 530004;4.广西特殊地质公路安全工程技术研究中心,广西南宁 530004)

**摘要:**为了研究水泥改性膨胀土在干湿循环下的工程渗透特性,设计水泥改性膨胀土的配合比,采取正交设计试验方法,通过图像分析软件PACS、无侧限抗压强度试验、室内渗透试验研究在干湿循环条件下水泥改性膨胀土的裂隙开展情况、强度衰减特性、水泥改性膨胀土渗透性能的变化规律。结果表明:土体渗透特性和强度受干湿循环次数的影响程度较大;在干湿循环条件下水泥改性的膨胀土含水率保持更稳定,抗裂率、强度、渗透率均得到明显的改善;低碱水泥土的裂隙率、强度衰减率、渗透率均大于普通水泥土。

**关键词:**膨胀土;水泥改性;干湿循环;裂隙性;渗透性;强度衰减

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

膨胀土广泛分布于世界各地,尤其是中国的膨胀土分布区域广大,且大部分分布于胡焕庸线以东人口稠密、经济发达的20多个省(区)市。膨胀土造成的工程问题具有数量多、危害大等特点。多年来,膨胀土的工程问题一直是岩土工程界的重大课题之一<sup>[1]</sup>。水泥作为最常见和使用最广泛的建筑材料,也是最常用对膨胀土进行化学改良的材料,目前对于水泥改良膨胀土已经有较多的研究。吴新明等<sup>[2]</sup>、吴建涛等<sup>[3]</sup>对水泥改良膨胀土的强度、胀缩特性以及界限含水率等指标进行了研究,认为水泥在改良膨胀土以及降低膨胀土胀缩性上有着显著的效果;Du等<sup>[4]</sup>研究了水泥掺入可以提高膨胀土的强度,但水泥存在一个最佳掺量;邓稀<sup>[5]</sup>通过对水泥改良膨胀土进行干湿循环试验,认为水泥的掺入对于膨胀土动力特性的衰减程度具有降低作用;黄伟<sup>[6]</sup>研究了在不同化学溶液侵蚀环境下,干湿循环对水泥改良膨胀土的侵蚀效应;刘加冬等<sup>[7]</sup>对水泥改良膨胀土在干湿循环下,裂隙的演化规律进行研究,认为水泥的掺入能显著降低膨胀土的裂

隙率和裂隙深度;张雷等<sup>[8]</sup>对掺加水泥的上海地区淤泥质黏土进行了室内渗透性试验研究;袁荣宏等<sup>[9]</sup>研究了以黄土为原材料的水泥土渗透系数宏观变化情况;陈四利等<sup>[10]</sup>研究水泥土在掺加其他不同材料后复合土的渗透性能,并分析了不同材料对复合土渗透性能的影响大小。上述研究对水泥改良膨胀土的工程应用具有重要作用,但目前鲜有文献对干湿循环下水泥品种、水泥掺量及养护龄期等影响因素对其裂隙及渗透特性影响进行系统的研究。作为防渗保湿层的水泥改性膨胀土,要求其具有低渗透性以及在外界干湿循环影响下裂隙开展缓慢的特性。因此,本文通过图像分析软件PACS及室内渗透试验研究在干湿循环条件下水泥改性膨胀土的裂隙开展情况以及水泥改性膨胀土渗透性能的变化规律,以评价水泥土是否适用于边坡防护,为后续研究提供理论基础。

## 1 试验内容

### 1.1 试验原材料

(1) 水泥:普通硅酸盐水泥(P.O42.5)和低碱度硫铝酸盐水泥(L.SAC 42.5)(表1)。

收稿日期:2021-01-06(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678166);广西科技创新引导项目(编号:桂科AC16380107);广西研究生教育创新计划资助项目(编号:YCSW2020041)

作者简介:鲍桂勇,男,硕士研究生.E-mail:1772767833@qq.com

\*通信作者:容洪流,男,博士,高级工程师.E-mail:ronghongliu@126.com

(2) 膨胀土:取自广西新柳南高速公路五塘服务区C广场,原状土样为灰黑色,呈较大的块状,土样坚硬,有蜡质光泽,表面光滑细腻,内含较多红褐色铁锰结核,物理力学性质指标如表2所示,根据膨胀土等级判定标准(自由膨胀率、液塑限),可判断该土样为中膨胀土。

(3) 水:自来水。

表1 水泥成分

品种	熟料主要成分	石膏	生石灰	活性混合材料
普通硅酸盐水泥 (P.O42.5)	CaO、SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	适量	—	6%~ 15%
低碱度硫铝酸盐水泥(L.SAC 42.5)	3CaO·3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · CaSO <sub>4</sub> 、2CaO·SiO <sub>2</sub>	适量	20%~ 50%	—

表2 膨胀土物理力学指标

自由膨胀率/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	液限/%	塑性指数	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	饱和度/%	胀缩总率/%	压缩模量/MPa
50	1.87	22.7	51.6	32.1	53.6	11.7	83.44	9.1	11.7

## 1.2 水泥改性膨胀土正交试验配合比

试验采用正交试验方法<sup>[11]</sup>,其因素包括水泥品种、水泥掺量、养护龄期、干湿循环次数。试验中水泥品种取普通硅酸盐水泥、低碱度硫铝酸盐水泥2个水平;水泥掺量取3%、4%、5%3个水平;养护龄期取0、3d、7d、14d、28d5个水平;干湿循环取0、1次、2次、3次、4次、5次6个水平;共39组正交试验。主要研究在干湿循环下各变量对水泥改性膨胀土裂隙开展和渗透性能变化的影响规律。因素和水平见表3(由于0水泥掺量的素膨胀土与水泥品种及养护龄期无关,故0掺量素土不参与正交设计)。

表3 影响因素及水平因素

水平	水泥品种	水泥掺量/%	养护龄期/d	干湿循环/次
1	普通硅酸盐水泥	3	0	0
2	低碱度硫铝酸盐水泥	4	3	1
3	—	5	7	2
4	—	—	14	3
5	—	—	28	4
6	—	—	—	5

## 1.3 水泥改性膨胀土干湿循环试验、无侧限抗压强度及渗透试验

水泥改性土渗透及开裂试验土样经过风干碾碎后过2mm筛,加水及水泥搅拌后闷料24h,制成上、下顶面直径分别为70mm、80mm、高40mm的渗透样,同时制成150mm×150mm的圆柱形无侧限抗压试件。水泥石的含水率及干密度分别控制为20%和1.6g/cm<sup>3</sup>,放在温度为20℃、湿度为95%的养护室中养护。

将达到养护龄期的试件放置于恒温恒湿条件的养护室中,每隔2h对试样进行一次洒水;脱湿过程通过将土样放置于温度为40℃的烘箱中来实现。

进行干湿循环的土样,以48h为一次干湿循环的周期后对土样称重及进行定点同角度的垂直拍照,得到其上表面的状态图,直到完成5次干湿循环。

根据《水泥石配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)中要求的水泥石专用渗透仪进行渗透试验。试验采用SS-25型水泥石渗透试验装置。

将达到养护龄期并完成干湿循环试验的土样取出,将融化的石蜡浇于试件周围防止试验期间水从土样侧面和渗透仪金属试模之间渗出影响渗透系数的测定。之后将试件放入水中48h,使其充分饱和。将饱和完成的试样装入SS-25型水泥石渗透仪中进行渗透试验,试验过程及数据处理依据《水泥石配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)执行。

依据土工试验规程,使用万能压力机静压成型,试件压实度为93%,试件脱模后进行养护并完成干湿循环。使用SG-100D型路面强度试验机进行无侧限抗压强度测试。

## 1.4 干湿循环裂隙开展研究方法

### 1.4.1 裂隙参数的确定

膨胀土开裂产生的裂隙由于其具有不确定性、复杂性和随机性。描述其裂隙发育的裂隙度没有一个统一的标准,而且裂隙的长度、宽度、深度以及密度等都会对膨胀土的性质产生一定的影响。国内外学者提出过很多定量描述裂隙度的方法。廖济川<sup>[12]</sup>提出以裂隙面积率、裂隙长度比与土块平均面积比等为定义的裂隙度表达方法;袁俊平等<sup>[13]</sup>、唐朝生

等<sup>[14]</sup>提出裂隙率的概念并对其进行简化;张家俊等<sup>[15]</sup>认为对土中裂隙进行研究时,应结合具体的研究内容选取对应的参数描述裂隙度进行分析。对于本文研究的水泥改性膨胀土在干湿循环下的渗透特性,考虑裂隙对于水泥土渗透性能的影响,选择土体表面裂隙率、裂隙长度以及裂隙平均宽度进行研究。

### 1.4.2 裂隙图像处理技术

采用文献[15]、[16]开发的PACS软件拍照图像处理定量描述土样的裂隙发育。拍摄完成的土样照片通过PhotoShop软件将图片进行灰度化以及二值化处理,并将照片剪辑为圆形,导入PACS软件进行处理。经过PACS软件处理过的图片可以很好地反映裂隙在土样表面的分布状况,并得到裂隙的相关参数(图1)。

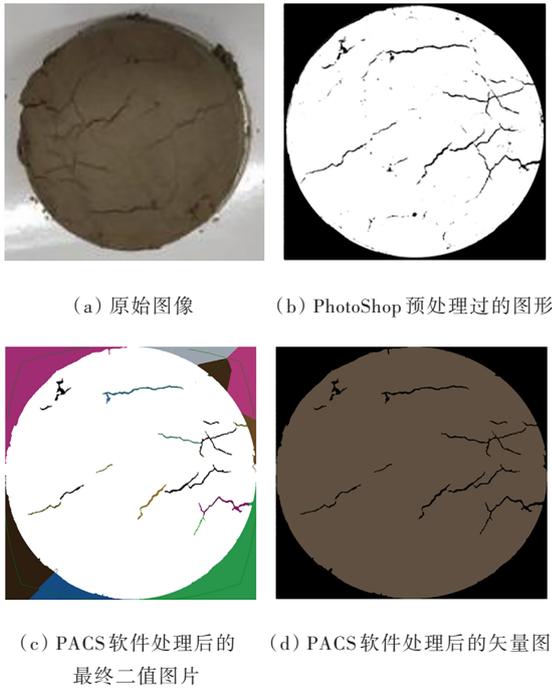


图1 裂隙图像处理过程

## 2 试验结果及分析

### 2.1 干湿循环试验裂隙开展结果研究

通过对土样进行干湿循环,得到每次干湿循环后试样的含水率以及裂隙参数变化情况。由于数据量大,故采用研究某一变量时固定其他变量的方式进行分析。首先是含水率,其中不同养护龄期土样含水率随干湿循环次数变化如图2所示,不同水泥品种及掺量的土样含水率随干湿循环次数变化如图3

所示,同时得到每次干湿循环含水率差随干湿循环次数的变化,如图4所示(P.OS代表普通硅酸盐水泥改性土,L.SS代表低碱度硫铝酸盐水泥改性土,SOIC为素土)。

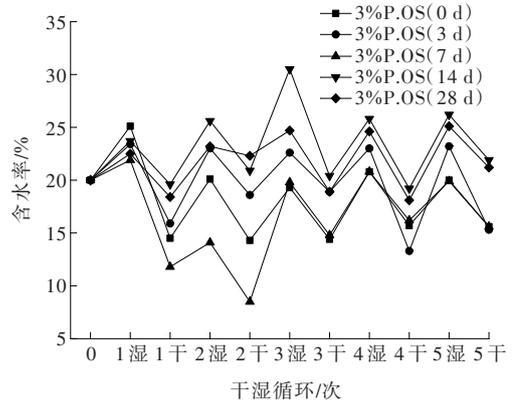


图2 不同养护龄期下3%普通水泥土含水率随干湿循环次数的变化情况

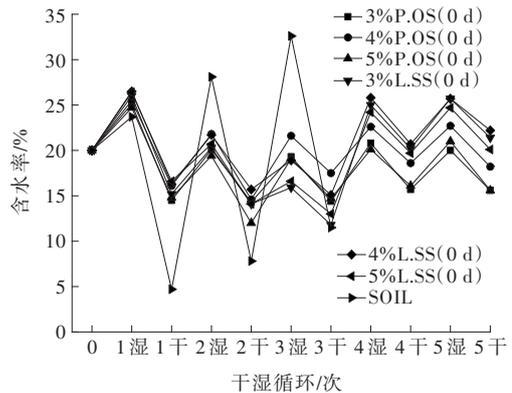


图3 不同水泥品种及掺量下养护0d水泥土含水率随干湿循环次数的变化情况

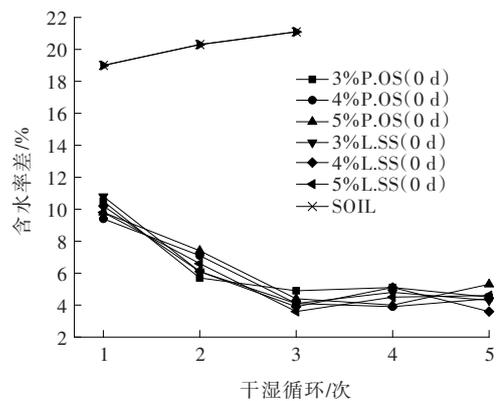


图4 不同水泥品种及掺量下养护0d水泥土含水率差随干湿循环次数的变化情况

由图2~4可知:在干湿循环作用下,试样的含水率会经历升高降低的过程,养护龄期对试样含水率

的影响无明显规律,但水泥土样含水率的升降幅度小于素土样。且随着干湿循环次数的增加,素土样在每个干湿循环周期含水率变化的幅度(即含水率差)越大,直到第3次后发生破坏,故素土样的干湿循环次数仅为3次。水泥土样随着干湿循环次数的增加,其含水率差反而逐渐减小并稳定。

其次是裂隙参数,分别对不同水泥品种水泥掺量及不同养护龄期下裂隙率、裂隙平均宽度和裂隙长度随干湿循环次数的变化情况进行分析,具体结果见图5~10。

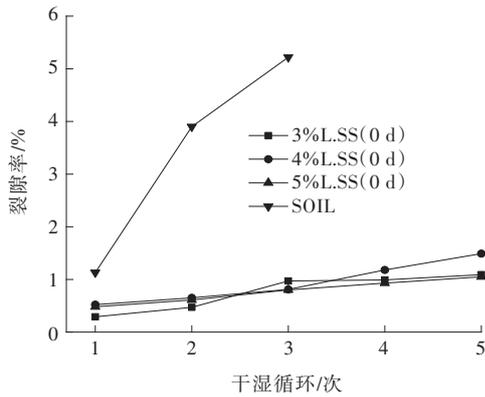


图5 不同水泥品种及掺量下养护0 d水泥土裂隙率随干湿循环次数的变化情况

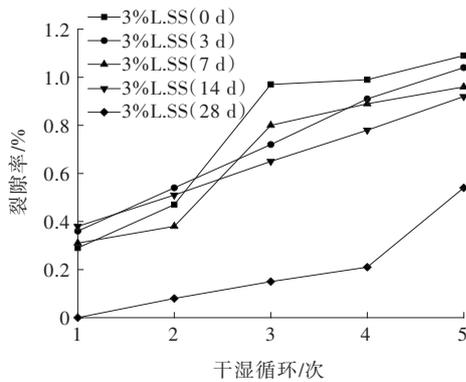


图6 不同养护龄期下3%低碱水泥土裂隙率随干湿循环次数的变化情况

由裂隙试验可知:普通水泥土在干湿循环条件下其表面只产生一层密集且薄的皴裂,而未开裂,而低碱水泥土和素土则产生裂隙。分析原因可能是两种水泥土及素土的塑限存在差异,由于试样含水率统一设置为20%,该含水率近似于低碱水泥土及素土的塑限,却小于普通水泥土的塑限,造成普通水泥土更“干”。由于土体的开裂含水率与土体的塑限存在联系,而普通水泥土在干湿循环下,含水率未达到

其开裂含水率,故在干湿循环下未产生裂隙。所以此次裂隙参数研究只针对低碱水泥土及素土。

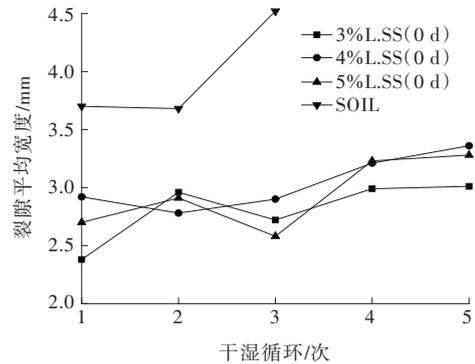


图7 不同水泥品种及掺量下养护0 d水泥土裂隙平均宽度随干湿循环次数的变化情况

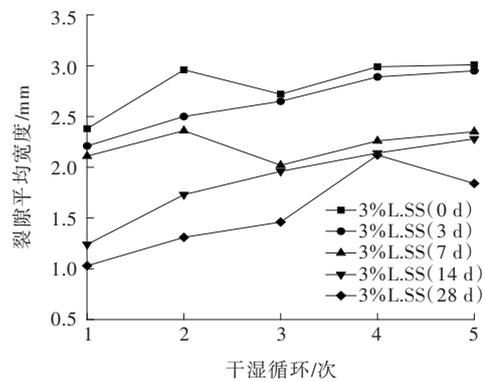


图8 不同养护龄期下3%低碱水泥土裂隙平均宽度随干湿循环次数的变化情况

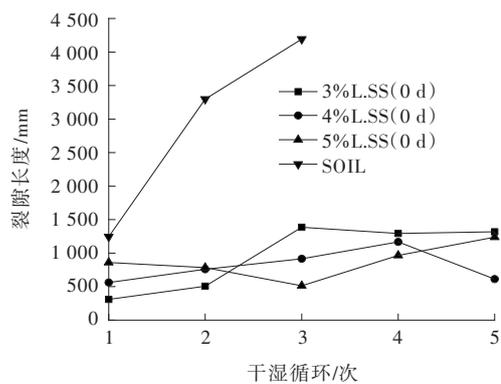


图9 不同水泥品种及掺量下养护0 d水泥土裂隙长度随干湿循环次数的变化情况

由图5~10可得:水泥土样的裂隙参数皆小于素土,且在干湿循环次数增加时,素土的裂隙参数增长速度较快,而水泥土则保持平缓的增长甚至稳定。结合土样含水率变化的规律,可得土样含水率变化的幅度与裂隙参数的增长速度呈正相关的关系。水

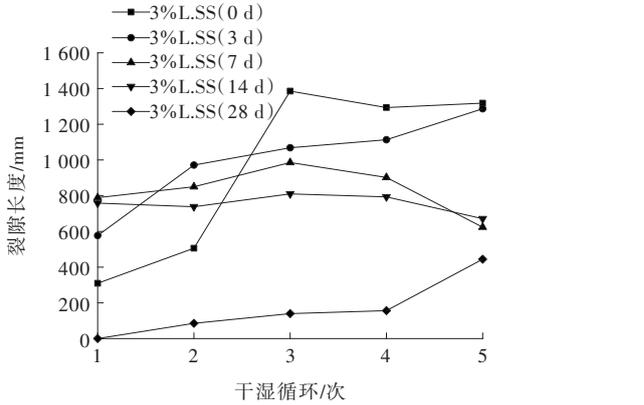


图10 不同养护龄期下3%低碱水泥土裂隙长度随干湿循环次数的变化情况

泥土由于其胀缩性小于素土,在干湿循环下,裂隙开展缓慢,水分没有足够的入渗通道,难以渗入低渗透性的土体。故水泥土在干湿循环下含水率和裂隙参数可以保持相对稳定,而素土由于裂隙发育过快,含水率变化剧烈,故其在3次干湿循环之后就发生破坏。

水泥土的养护龄期也对裂隙参数产生影响,养护龄期越长,试样裂隙发育就越差,分析原因应是水泥土的水化反应逐渐完成,水泥土的胀缩性及水稳定性都得到改善,可更好地抑制裂隙的发育。3%~5%的水泥掺量由于变化幅度不大,故对于裂隙参数影响并不明显,但少量水泥就可对土样的裂隙发育起到明显的抑制作用。

2.2 干湿循环试验强度衰减结果研究

试件成型后,依据标准养护达到龄期后,通过无侧限抗压强度试验,得到无侧限抗压强度与养护龄期的关系(图11)。达到7 d龄期的试件经历干湿循环,进行无侧限抗压试验得到不同水泥品种及掺量的无侧限强度与干湿循环次数的关系如图12所示。

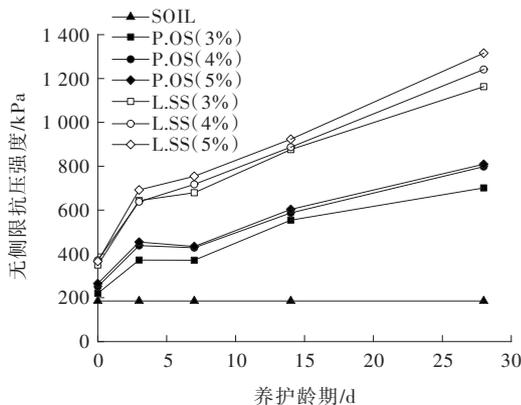


图11 无侧限抗压强度与养护龄期的关系

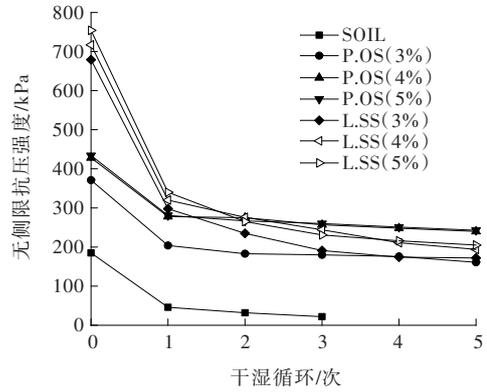


图12 不同水泥品种及掺量下养护7 d水泥土无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化情况

由图11、12可知:① 经过水泥改良:膨胀土的无侧限抗压强度得到较大提高。低碱水泥对膨胀土强度特性的改良效果要好于普通水泥,7~28 d强度近似呈线性增长;② 干湿循环对水泥改良膨胀土和素土的无侧限抗压强度有显著的影响。其中素土经历第1次干湿循环后强度衰减率最大,其次是低碱水泥土,普通水泥土强度衰减率最小,与裂隙试验结果相吻合。

结合曲线走势,水泥土和素土在经历第1次干湿循环后无侧限抗压强度随干湿循环次数强度衰减速率有所下降,直至第3次干湿循环才保持小幅度稳定降低。分析原因是试样经历第1次干湿循环时,发生大幅的胀缩,导致裂隙发育迅速;当再次经历干湿循环时,使原有的裂缝一张一合,进一步的扩展、延伸、贯通;当经历第3次干湿循环后,裂隙已经发展到了一定数量及宽度,产生了足够的胀缩空间,胀缩变形约束减小,使胀缩特性趋于稳定。因此试样强度逐步趋于稳定。其中普通水泥土比低碱水泥土强度下降更缓慢,且普通水泥掺量4%、5%的水泥土残余强度高于低碱水泥土,其原因可能是20%的含水率未达到普通水泥土的塑限和开裂含水率,这与干湿循环条件下普通水泥土只是表面出现皸裂情况相吻合。

2.3 渗透试验渗透结果研究

根据正交试验方案对渗透试件进行渗透试验,得到各试样的渗透系数,对其进行极差分析以及对素土渗透系数进行分析,相关分析结果如表4.5所示。

由表4可知:水泥土渗透系数受到干湿循环次数的影响最大,水泥品种和养护龄期其次,而水泥掺量

对渗透系数的影响最小。

表4 渗透系数极差分析  $10^{-9} \text{ cm/s}$

编号	水泥品种	水泥掺量	养护龄期	干湿循环	误差列	渗透系数 $k$
$\bar{k}_1$	11.03	12.33	13.03	9.38	10.78	
$\bar{k}_2$	12.82	11.82	12.14	10.57	12.00	
$\bar{k}_3$	—	11.52	11.75	11.69	13.11	渗透系数总和
$\bar{k}_4$	—	—	11.33	12.85	12.71	$\sum k = 464.05$
$\bar{k}_5$	—	—	11.09	13.52	12.11	
$\bar{k}_6$	—	—	—	13.87	11.01	
极差 $R$	1.79	0.81	1.94	4.49	2.33	

表5 素土渗透系数

干湿循环次数/次	渗透系数/ $(10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$
0	10.01
1	14.24
2	19.33
3	25.61

渗透系数随各影响因素的变化规律趋势如图13~16所示。

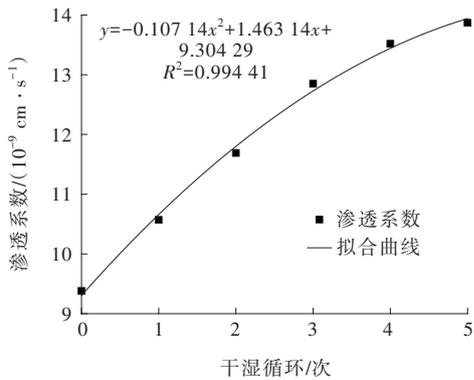


图13 水泥土渗透系数随干湿循环次数的变化规律

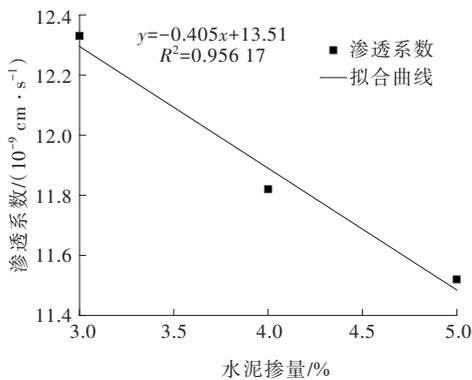


图14 水泥土渗透系数随水泥掺量的变化规律

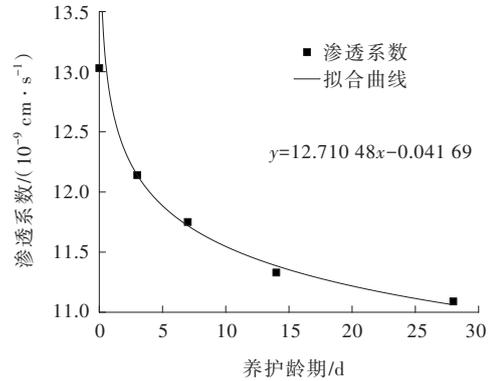


图15 水泥土渗透系数随养护龄期的变化规律

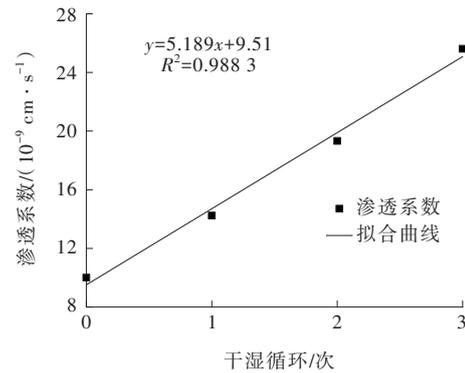


图16 素膨胀土渗透系数随干湿循环次数的变化规律

由图13~16可知:

(1) 干湿循环次数对渗透系数的影响最为显著,干湿循环5次后的水泥土样,其渗透系数相对于干湿循环0次的试样来说,增大超过40%,但是随着干湿循环次数的增加,其对于渗透系数的影响也在变小。而对于素土,干湿循环3次后的试样,其渗透系数相对于干湿循环0次的试样来说,增大155.84%,呈线性变化规律。分析原因应是素土在干湿循环下其裂隙开展速度快,给水分入渗提供通道,当裂隙发育贯通后,试件就发生破坏,故素土样只进行3次干湿循环就发生破坏。而水泥土样由于其裂隙发育缓慢,给水分提供的入渗通道较少,故渗透系数增大较为缓慢。

(2) 水泥掺量为3%~5%时,水泥掺量对渗透系数的影响不大,且渗透系数呈线性减小,故可认为水泥掺量未达到对于渗透率来说的最佳水泥掺量。

(3) 养护龄期对试样渗透系数的影响较大,养护28 d的试样其渗透系数仅相当于养护0 d试样的85.11%,且可以看出,在养护初期,水泥土的渗透系数下降较快,而养护后期,渗透系数下降速度则变慢。分析原因应是:随着水泥水化反应的逐步完成,

水化产物的增多使得水泥土的水稳定性更好,水泥土的裂隙发育越来越缓慢,而水泥土的水化反应则主要发生在养护前期。故水泥土样的渗透系数在养护龄期内是先快速减小后缓慢减小。

(4) 水泥品种对渗透系数也产生了较大的影响,未经历干湿循环的素土样渗透系数接近甚至略好于水泥土渗透系数,但经历干湿循环的水泥土样的渗透系数则小于素土样。普通水泥土的渗透系数要明显低于低碱水泥土。分析原因应是:该试验普通水泥土样裂隙发育不明显,而低碱水泥土裂隙有明显的可量化分析发育,故普通水泥土有更低的渗透系数。而未经历干湿循环的素土样由于细粒径颗粒占比多,所以空隙率小,渗透性低,水泥土由于改善土的粒径构成,细组分减少,所以空隙率有所增加,渗透性可能会有所提高。但在干湿循环后,素土的裂隙发育快,渗透系数急剧提高,水泥土的裂隙发育慢,渗透系数提高速度远远不及素土。

### 3 结 论

(1) 在干湿循环下,土体经历吸湿脱湿的过程,表现在其含水率都发生从低到高再到低的循环变化,素土的含水率变化程度远远大于水泥土,且随着干湿循环次数的增加变化越来越剧烈;而水泥改性土的含水率变化程度则趋于稳定。

(2) 干湿循环下试样表面裂隙开始发育,由此得到素土裂隙评价指标明显大于水泥土。

(3) 土体渗透特性受到各因素影响的程度由大到小分别是水泥品种、干湿循环次数、养护龄期、水泥掺量。

(4) 由于在干湿循环下素土的裂隙率增长速度快,导致素土的渗透系数呈直线增长的趋势,而水泥土的裂隙率增长缓慢,导致水泥土的渗透系数呈增长速度越来越慢的趋势,而且水泥土的渗透系数远远小于素土,展现良好的抗渗性。

(5) 土体无侧限抗压强度衰减受干湿循环的影响显著,且普通水泥土比低碱水泥土维持强度能力更好。

### 参 考 文 献:

- [1] 廖世文,曲永新,朱永林.全国首届膨胀土科学研讨会文集[M].成都:西南交通大学出版社,1990.
- [2] 吴新明,巫锡勇,周明波.水泥改良膨胀土试验研究[J].路基工程,2007(2):94-95.
- [3] 吴建涛,姚开想,杨帅,等.引江济淮工程膨胀土水泥改性剂量研究[J].岩土工程学报,2017,39(S1):232-235.
- [4] DU Y J, LI S L. Swelling shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China[J]. Engineering Geology, 1999, 53(3/4): 351-358.
- [5] 邓稀.干湿循环下水泥掺入对膨胀土动力特性影响的试验研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [6] 黄伟.水泥改性膨胀土在侵蚀环境下的干湿循环效应研究[D].重庆:西南大学,2018.
- [7] 刘加冬,路洪斌,殷宗泽.水泥改良膨胀土的裂隙演化规律试验研究[J].嘉兴学院学报,2020,32(6):58-63.
- [8] 张雷,王晓雪.水泥土抗渗性能室内实验研究[J].岩土力学,2006,27(10):1193-1196.
- [9] 袁荣宏,白杰,吴桂芬.水泥土渗透系数随围压变化的试验研究[J].水利水运工程学报,2012(5):13-17.
- [10] 陈四利,董凯赫,宁宝宽,等.水泥复合土的渗透性能试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(4):758-765.
- [11] ZHOU J K, CHEN X D. Stress-strain behavior and statistical continuous damage model of cement mortar under high strain rates[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013,25(1): 120-130.
- [12] 廖济川.开挖边坡中膨胀土的工程地质特性[C]//非饱和土理论与实践学术研讨会文集.北京:中国土木工程学会土力学及基础工程学会,1992:102-117.
- [13] 袁俊平,殷宗泽.膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J].水利学报,2004(6):108-113.
- [14] 唐朝生,崔玉军, TANG A M, 等.膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J].岩土工程学报,2012,34(12):2181-2187.
- [15] 张家俊,龚壁卫,胡波,等.干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J].岩土力学,2011,32(9):2729-2734.
- [16] LIU C, TANG C S, SHI B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. Computer and Geosciences, 2013,57: 77-80.