

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2425

有荷干湿循环条件下不同膨胀土抗剪强度基本特性

杨和平¹, 唐咸远^{1,2}, 王兴正¹, 肖 杰¹, 倪 啸¹

(1. 长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410004; 2. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006)

摘 要: 针对膨胀土分布区公路边坡常浅层坍滑现状, 选取南、北方 3 种典型膨胀土样, 模拟干湿循环并计及边坡破坏时滑面的上覆压力, 改变常规试样吸湿及施剪条件开展试验研究, 以获得较符合实际的膨胀土抗剪强度及其衰减规律。结果表明: 不同上覆压力对膨胀土抗剪强度的影响为荷载越大其强度绝对衰减率越小; 用双直线能较好表征其抗剪强度线特征, 强度指标 c 、 φ 宜按高、低应力段分别获取; 随干湿循环次数增加, c 值呈指数函数衰减, 是造成边坡浅层坍滑的主要原因; φ 值随作用次数增加虽有减小趋势, 但降幅不大; 通过控制基本相同的试验条件, 实测得 3 种膨胀土的最终抗剪强度均降至某一幅值范围。研究结论为解读膨胀土坡为何多浅层坍滑提供了有价值的信息。

关 键 词: 膨胀土边坡; 有荷干湿循环; 低应力; 抗剪强度; 试验研究

中图分类号: TU 411.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2311-07

Shear strength of expansive soils under wet-dry cycles with loading

YANG He-ping¹, TANG Xian-yuan^{1,2}, WANG Xing-zheng¹, XIAO Jie¹, NI Xiao¹

(1. Key Laboratory of Road Structure & Materials of Ministry of Communications, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 2. Department of Civil Engineering of Guangxi University of Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China)

Abstract: The shallow landslide of highway slopes in areas with expansive soil often occurs. Three representative types of expansive soil from the south and north of China are tested under wet-dry cycle in the laboratory. The collapse of slope surface in low pressure conditions, and the conventional process of saturation and shear test are considered in the experimental study. The purpose is to obtain the actual shear strength of expansive soil and its reduction. The results show that the shear strength of the expansive soil affected by different vertical load is not identical. The larger vertical load results in the smaller reduction ratio of shear strength. The sectional double line method is adopted to approximately reflect the nonlinear characteristics of strength of expansive soil. It can also be used to calculate the index of shear strength c and φ . The c reduces exponentially as the number of wet-dry cycles increases, and it is considered as the main reason for the shallow landslide. φ decreases as the number of wet-dry cycles increases. The amplitude of reduction decreases. Under the same wet-dry conditions, the ultimate shear strengths of different expansive soils drop to a certain range. Research conclusion can provide reference for analysis of shallow landslide of expansive soil slope effectively.

Keywords: expansive soil slope; wet-dry cycle with loading; lower stress; shear strength; experimental research

1 引 言

大气干湿循环作用下膨胀土边坡多呈浅层破坏, 穿越膨胀土分布区的新建公路经历一个雨季, 挖方边坡常连片滑坍, 造成巨大的工程经济损失并

带来沿线生态环境破坏或水土流失^[1]。因富含强亲水性蒙脱石类黏土矿物, 膨胀土对环境湿热变化异常敏感, 经历干湿循环作用后, 其整体性严重破坏, 抗剪强度呈明显的变动特征^[2]。而出露于大自然中边坡的稳定性很大程度上取决于坡体土在最不利条

收稿日期: 2017-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50978035, No. 51608053); 道路结构与材料交通行业重点实验室开放基金项目(No. kfj100208); 湖南省自然科学基金(No. 2017JJ3335); 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金重点项目(No. kfj20160401)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (50978035, 51608053), the Open Fund of Key Laboratory of Road Structure & Materials of Ministry of Communications (Changsha) (kfj100208), the Natural Science Foundation of Hunan Province (2017JJ3335), the Open Fund of Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education (Changsha University of Science & Technology) (kfj20160401).

第一作者简介: 杨和平, 男, 1954 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事路基路面工程、特殊土路基研究。E-mail: cscuyang@163.com

件下的抗剪强度,故深入研究特定条件下膨胀土的基本强度特性,弄清边坡常浅层坍塌的原因并据以确定有效工程治理措施,具有重要的理论和工程意义。

以往确定膨胀土抗剪强度的试验研究中,王星运等^[3]按边坡土体风化与否将其分为两部分,对上部风化土层采用残余剪来确定强度指标;殷宗泽等^[4]认为裂隙的存在使边坡土体的抗剪强度强弱分明,故提出边坡稳定分析宜分层代入相应强度参数,可获得膨胀土坡的坍塌破坏结果;吴珺华等^[5]建立了全吸力范围内非饱和膨胀土的抗剪强度模型;程展林^[6]、肖杰^[7]等考虑边坡浅层破坏时的低应力条件,分别采用双直线和幂函数拟合试验数据定膨胀土抗剪强度线,但没有把强度衰减与干湿循环效应紧密加以联系。研究者做剪切试验时对干湿过程的模拟也存在一定差别^[8-9],考虑坍塌坡体的实际滑面离坡面总有些距离(即处于不同上覆土压条件),膨胀土吸湿后的变形与其无荷膨胀量间必存在差异,因此,认为膨胀土样制备过程中吸湿条件的模拟需改为有荷状态;而浅层滑塌边坡的滑面处实际受到竖向土压往往小于 50 kPa,也与常规直剪试验所能施加的上覆压力不匹配,故剪切试验中的施剪条件也需相应改进。目前,笔者模拟干湿循环条件用改进法仅对南宁膨胀土做过试验研究^[10],我国膨胀土分布广,各地膨胀土的性状复杂多变,为获取不同类型膨胀土基本强度特性,本文取南北方代表性典型土(岩)样做平行试验,探究其抗剪强度共性及普遍

衰减规律。

2 试验设计

2.1 试验用土

选取了 2 类 3 地 3 种代表性土样,分别为广西南宁和百色的典型南方风化残积型膨胀土,代表热带与亚热带地区的膨胀土类;另取北京丰台区膨胀岩风化样,属于北方典型的沉积型膨胀泥岩(土),作为暖温带半湿润半干燥大陆性气候区域的代表。

南宁样取自南宁外环路五塘互通中线(K24+000)深 2~3 m 处,其天然含水率为 17%,干密度为 1.70 g/cm³ 左右,自由膨胀率为 62%,蒙脱石含量和比表面积均属中等,按与国际接轨的膨胀土判别分类微观与宏观结合双控指标体系标准^[11-12],其胀缩等级应定为中等;百色土的取样点位于百隆高速路 K154+760 处,取样深约为 6 m,以灰白色风化泥岩为主,按双控指标分类其胀缩等级可归为中强型;丰台样取自北京西六环高速路 K10+450 处路堑段,边坡开挖出露的断面呈现 4 种沉积土的交替分层,选取其中一深为 5 m 的蓝灰色泥岩层作研究对象,实测得其蒙脱石含量和比表面积两微观指标均很大,但自由膨胀率却较低,显示与南方风化残积型膨胀土的明显差异,同样按双控指标可综合将其定为强膨胀土。考虑到膨胀土微观指标测试难而复杂,为确保各样土性试验结果准确及具可比性,3 种土的宏、微观试验均是请中科院地质与地球物理研究所曲永新教授完成,表 1 即为外协提供的各项指标测试值。

表 1 3 种膨胀土的基本性质指标

Table 1 Characteristic indices of three types of expansive soil

膨胀土 样名称	土的相 对密度 G_s	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性 指数 I_p	颗粒组成 /%				蒙脱石 含量/%	比表面积 (m ² /g)	自由膨胀率 δ_{ef} /%	体缩 /%	混层比 /%
					>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm	<0.002 mm					
南宁样	2.7	46.04	23.77	22.27	0.30	56.14	43.56	42.29	11.78	105.53	62	10.24	30
百色样	2.7	56.26	21.37	34.89	0.10	52.02	47.88	45.20	16.58	130.77	82	9.13	45
丰台样	2.7	64.91	33.21	31.70	0.35	35.33	64.32	45.20	45.44	331.55	42	/	/

2.2 重塑样制备

现场要获取足够多均匀的原状膨胀土样相当难,故本次试验全部采用重塑土。从 3 地取回实验室的 3 种土经自然风干后,均碾碎过 2 mm 筛,按 17.0% 的含水率配成湿土,闷料 24 h 后用静压法制样,试样的干密度都按 1.70 g/cm³ 控制,并分别限制其含水率和干密度的试验误差在 $\pm 0.5\%$ 和 ± 0.02 g/cm³ 以内,保证实施干湿循环前各土样初始状态基本一致。

2.3 有荷干湿循环的实现

为完成预定的循环次数,每种土样准备 4 组,每 8 个样为一组进行有荷干湿循环试验。试样上、下两面各用一张滤纸和一块透水石覆盖,以防吸水膨胀后表面土粒散落;从每组样中取 5 个置于水槽中,分别施加重 5、15、30、50 和 75 kPa 的竖向压力(见图 1),槽内注水至与试样上透水石持平,静置 3~4 d 让其尽量吸水饱和;考虑试验过程中吸湿膨胀后土样将略高于环刀上缘,特加工一护环使那

部分土的侧限不变（见图 2）；其余 3 个样采用 24 h 真空抽气饱和增湿，按吸水样的膨胀力约 100 kPa 控制其饱和过程中体积不变；经测试两法所得试样的饱和度相差无几（均 $\geq 97\%$ ），分别称其重量；干燥过程是置试样于烘箱脱水，模拟自然环境气温最高 40 °C 控制箱内温度，烘 24 h 后再称重，如此即完成 1 次干湿循环。4 组样各实施 0、2、4、6 次干湿循环。

2.4 实施土样剪切

对完成拟定干湿循环次数的饱水试样卸除荷载后，迅速装入剪切盒并施加相应竖向压力，尽量减小卸、加荷过程影响；逐组进行慢剪测定抗剪强度，剪切速率均采用 0.02 mm/min；施剪时一组 8 个样上分别施加对应荷吸湿时的 5、15、30、50、75、100、200、300 kPa 共 8 种竖向压力。试验在南京土壤仪器厂生产的四联直剪仪上完成，因其标准配荷的最小压力为 50 kPa，试验时 5、15 和 30 kPa 3 级低压力只能采取等效荷重块的直接施加，其余竖向压力均按仪器操作说明由杠杆配重施加。整个试验测试过程均严格按公路土工试验规程^[13]的要求进行。

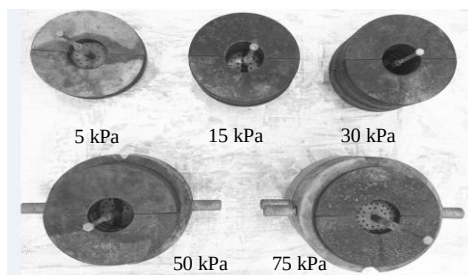


图 1 干湿循环有荷饱和

Fig.1 Wet-dry cycle saturation with loading



图 2 护环装置

Fig.2 Retaining ring device

3 试验测试结果

3 个系列共 96 个土样分别按设定的干湿循环次数完成了慢剪试验，所测得各土样的剪切数据经认真分析整理后，其最终结果在表 2 中列出。

表 2 抗剪强度试验结果
Table 2 Results of shear strength tests

剪切时竖直 应力/kPa	南宁土剪应力/kPa				百色土剪应力/kPa				丰台（岩）土剪应力/kPa			
	N=0 次	N=2 次	N=4 次	N=6 次	N=0 次	N=2 次	N=4 次	N=6 次	N=0 次	N=2 次	N=4 次	N=6 次
5	12.21	7.93	5.52	4.14	12.69	6.38	5.72	5.17	16.90	7.34	5.00	3.79
15	16.00	13.74	13.56	12.87	25.56	17.39	14.78	12.22	29.22	19.48	16.00	12.52
30	27.01	22.34	20.67	19.34	29.34	19.67	18.34	16.60	41.68	28.50	22.00	19.34
50	35.77	32.00	30.10	28.29	42.58	33.34	28.77	27.00	57.15	40.00	33.15	32.39
75	45.60	40.98	37.72	37.02	50.41	45.73	40.65	39.35	70.61	50.72	43.90	41.14
100	55.64	50.80	47.85	47.50	60.96	56.40	54.52	52.35	84.12	74.60	69.13	67.25
200	95.09	90.59	87.00	84.78	100.02	95.65	90.16	85.19	135.63	133.59	109.30	102.52
300	140.69	133.03	129.56	128.69	128.34	119.64	117.90	112.06	179.46	175.12	156.86	153.38

注：N 为干湿循环次数。

4 测试结果的分析与评定

4.1 竖向压力对抗剪强度的影响

当前有关竖向压力对膨胀土抗剪强度影响的试验研究资料仍较少，为便于定量分析有荷干湿循环条件下作用不同荷载对土样抗剪强度随干湿循环次数的衰减规律，特定义膨胀土强度绝对衰减率 $A_{i,\sigma}$ 为

$$A_{i,\sigma} = \frac{|\tau_{i,\sigma} - \tau_{0,\sigma}|}{\tau_{0,\sigma}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： i 为干湿循环次数； σ 为竖向压力； $\tau_{i,\sigma}$ 为竖向压力为 σ 且经过 i 次干湿循环后的抗剪强度（kPa）； $\tau_{0,\sigma}$ 为在竖向压力 σ 作用下，没有经历干湿循环作用过程的膨胀土抗剪强度（kPa）。

为使研究更简洁明了，仅选取表 2 中 3 组土样在 3 级竖向压力 5、50、100 kPa 下的实测值做分析，将相应数据代入式（1）算得结果（见表 3）。为进一步分析表 3 数据，绘出强度绝对衰减率与干湿循环次数的关系曲线（见图 3）。分析图 3 可知：竖向压力一定时，随干湿循环次数增加，3 种膨胀土的强度绝对衰减率均逐渐变大，但每经过 2 次干湿循

环后的衰减增幅在逐渐减小,说明最初的干湿循环对强度衰减影响较大;干湿循环次数相同时,同一土样的竖向压力越大,其强度绝对衰减率越小。因

此,增大上覆压力能减小干湿循环作用对膨胀土强度衰减的影响,再次证实了荷载对膨胀土干湿循环过程中的强度衰减能起到有效的抑制作用^[14]。

表 3 不同干湿次数、不同竖向压力下的膨胀土强度绝对衰减率

Table 3 Shear strength reduction ratios of expansive soil with different wet-dry cycles and loadings

竖向压力 /kPa	南宁土				百色土				丰台土			
	$\Delta_{0,\sigma}/\%$	$\Delta_{2,\sigma}/\%$	$\Delta_{4,\sigma}/\%$	$\Delta_{6,\sigma}/\%$	$\Delta_{0,\sigma}/\%$	$\Delta_{2,\sigma}/\%$	$\Delta_{4,\sigma}/\%$	$\Delta_{6,\sigma}/\%$	$\Delta_{0,\sigma}/\%$	$\Delta_{2,\sigma}/\%$	$\Delta_{4,\sigma}/\%$	$\Delta_{6,\sigma}/\%$
5	0	35.05	54.79	66.09	0	49.72	54.93	59.26	0	56.57	70.41	77.57
50	0	10.54	15.85	20.91	0	21.70	32.43	36.59	0	30.01	41.99	43.32
100	0	8.70	14.00	14.63	0	7.48	10.56	14.12	0	11.32	17.82	20.05

4.2 抗剪强度参数的确定

已有研究^[15-16]指出,低应力条件实测的膨胀土剪切强度线具有明显的非线性特征,且测试时采用的上覆压力越小越显著。究其原因,主要是低压力下的膨胀土吸湿增多、体积膨胀,直接导致其干密度变小和含水率增大,且上覆压力越小,体胀越大,测得的相应最大剪应力会更小。因而按规范规定的方法开展直剪试验,仅测高应力条件下剪切力并做分析,将得不到膨胀土坡浅层坍塌面上的真实抗剪强度。鉴于膨胀土边坡常发生浅层破坏的特性,工程中宜考虑将高、低应力分段拟合成交直线来获取不同区段内的强度参数值,即分别将 5、15、30、50、75 kPa 的 5 测点及 75、100、200、300 kPa 的 4

测点分两段,如图 4(a)所示进行直线拟合,竖向压力为 0~50 kPa 时为低应力段,竖向压力为 50~200 kPa 时为高应力段,分别对应图中左侧和右边三列拟合方程,其对应的 c 、 φ 值见表 4,同时为方便对比,也绘出单直线强度线,如图 4(b)。分析图 4 可知,各土样拟合分段式强度线的相关系数 R^2 均大于 0.95,表明用单、双直线表述膨胀土抗剪强度均合理可行,但单直线的 c 值比双直线低应力段的大很多(百色、丰台土经 6 次干湿循环后达 3 倍多);进行膨胀土边坡稳定分析时,应依据可能滑面深度,其 c 、 φ 值分别取高、低应力段相应指标,易获得较为符合实际的结果。

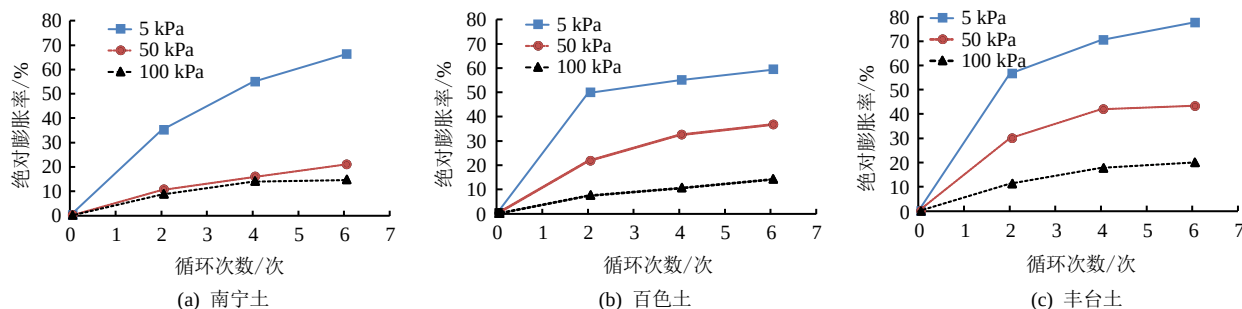


图 3 强度绝对衰减率与干湿循环次数的关系

Fig.3 Relationships between reduction ratio of shear strength and wet-dry cycles

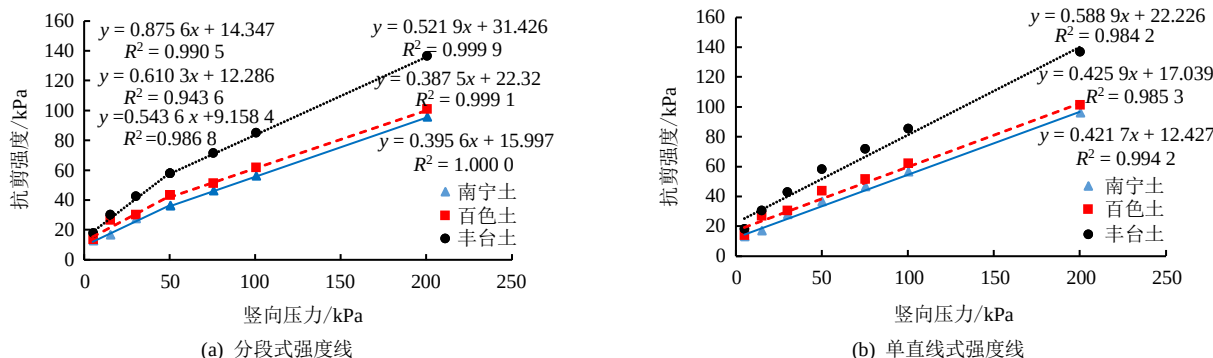


图 4 未经干湿循环的强度线

Fig.4 Lines of shear strength of expansive soil with 0 wet-dry cycle

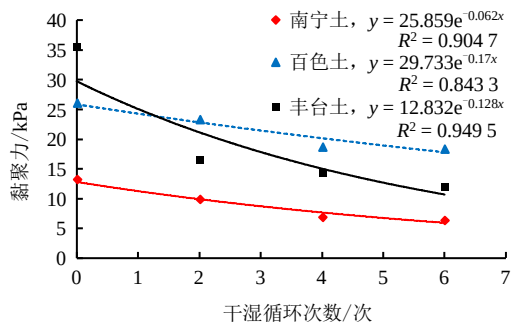
表 4 膨胀土高、低应力段抗剪强度指标

Table 4 Shear strength parameters of high and low stresses

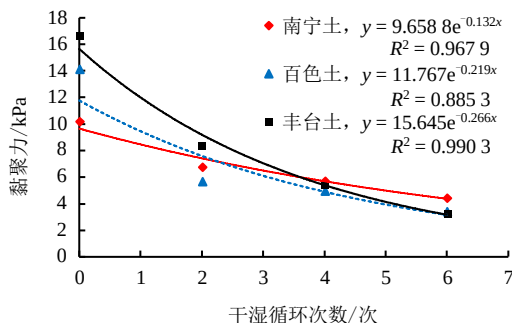
循环 次数	南宁土有荷干湿重塑样				百色土有荷干湿重塑样				丰台土有荷干湿重塑样			
	高应力段		低应力段		高应力段		低应力段		高应力段		低应力段	
	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
0	22.81	13.30	26.04	10.22	19.21	26.13	27.17	14.16	25.88	35.58	37.09	16.65
2	22.22	9.92	25.38	6.79	18.36	23.35	28.24	5.70	28.57	16.60	30.78	8.36
4	22.12	6.91	24.27	5.73	18.70	18.71	25.45	5.00	25.51	14.28	28.00	5.42
6	21.98	6.38	24.37	4.48	17.64	18.60	25.41	3.44	25.09	12.04	27.94	3.27

4.3 c 、 φ 值的变化规律

分析表 4 中数据可发现, 无论哪种膨胀土及其高、低应力段, 随干湿循环次数增加, 黏聚力 c 值均不断降低, 内摩擦角 φ 的变化则呈现上下小幅波动。为进一步探究黏聚力 c 值的变化规律, 以干湿循环作用次数为横坐标, 将黏聚力作纵坐标分高、低应力段分别进行曲线拟合, 分析结果见图 5。



(a) 高应力段



(b) 低应力段

图 5 3 种膨胀土黏聚力衰减的曲线拟合

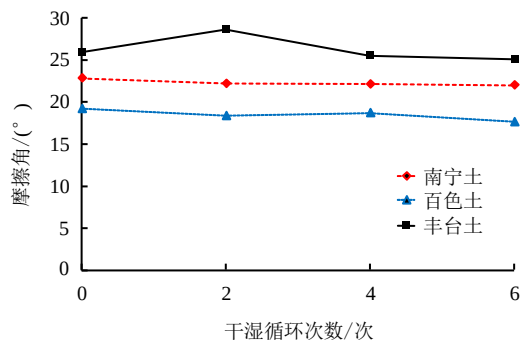
Fig.5 Curves fitting of c reduction with 3 types expansive soil

对图 5 中 c 值衰减曲线做数值拟合, 得到 3 种土的黏聚力随干湿循环次数增加的衰减较接近指数函数关系, 其中南宁土和丰台土低应力段的相关系数均在 0.95 以上, 百色土的相关系数达到 0.89, 仅丰台土在高应力段的拟合程度较低 ($R^2=0.84$), 这可能是因丰台沉积型膨胀土中 $<0.005\text{ mm}$ 的细颗粒含量最多, 未经干湿循环时实测到的黏聚力偏大所致。从整体上分析, 膨胀土强度指标 c 值与干湿循

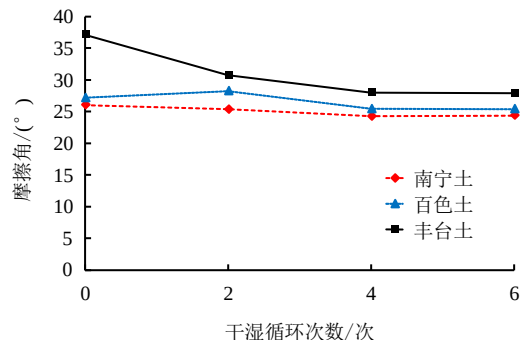
环次数 N 的关系可表达为: $c=ae^{-bN}$ (其中 a, b 为常数), 尽管测试数据值与理论拟合尚存一点误差, 但用它来分析实际工程中膨胀土的强度衰减仍具一定参考价值。

另外, 基于内摩擦角 φ 随干湿循环次数增加而降幅并不明显的状况, 分高、低应力段取每组样在数次干湿循环下的 4 个内摩擦角平均值, 给出图 6。

由图可直观看到, 除丰台土低应力段外, 其他 5 处实测内摩擦角的变动范围均较小, 特别是南宁、百色土的波动区间很小, 而丰台土低应力段出现偏差的原因是土样未经干湿循环时所测得的内摩擦角偏大, 这也可能与该土粒度成分中 $>0.075\text{ mm}$ 的粗粒含量最多有关。因此, 在试验误差允许范围内, 低应力条件下每种土内摩擦角的取值用平均值来代替也应能满足工程应用要求。



(a) 高应力段



(b) 低应力段

图 6 3 种膨胀土内摩擦角的变化范围

Fig.6 φ range of 3 types of expansive soils

4.4 浅层破坏时抗剪强度取值探讨

浅层坍塌是所有裸露膨胀土坡都面临的通病,实践已表明,它与膨胀土的类型和成因似乎无直接关系,但破坏的厉害程度与所在地气候环境即大气干湿循环密切相关。为探究其中原因,现从确定的膨胀土最终抗剪强度来做分析。本研究所选3土样为我国南、北方典型且具一定代表性的膨胀土,试样制备时控制三者的初始状态(湿度、密度)相同,且干湿循环过程(条件)也保持一致,同时均用同一方式测得各自的抗剪强度。现由表2中选取3个土样低应力段4测点值,进行初始抗剪强度(0次干湿循环)与最终抗剪强度(6次干湿循环)比较,均以施剪时竖向荷重为横标、实测的最大剪应力(抗剪强度)为纵标做出相应直方图(见图7、8)。

分析两图可知,3种土的初始抗剪强度与其胀缩等级成正比,恰与笔者用改进法测不同膨胀土加州承载比(CBR值)时的结果吻合^[17],这一有趣现象的产生原因真还值得探究;而6次干湿循环后(拟定其为浅层破坏强度)不同荷重下3种土的抗剪强度基本落入同一幅值范围,三者差异小(尤其 ≤ 30 kPa时),可用算术平均值表征,即得到膨胀土坡浅层破坏时滑面强度降至的范围。

尽管膨胀土的成因类型、胀缩等级不同,只要置于完全相同的外界气候环境及荷载条件下,经多次干湿循环作用,其最终抗剪强度均会降至同一幅值范围,这就解答了膨胀土地区筑路为何逢逢必滑的原因。

按这种分析,对表2中低应力下4测点3土样经6次干湿循环的强度平均值(4.37、12.54、18.43、29.23 kPa)进行拟合,得 $y=0.5305x+2.8795$ ($R^2=0.986$),该库仑强度线对应的 $\varphi=27.95^\circ$, $c=2.88$ kPa,也再次证实了正是“滑面处土体的黏聚力急剧降低而导致膨胀土边坡浅层坍塌频繁发生”的研究结论^[18]。

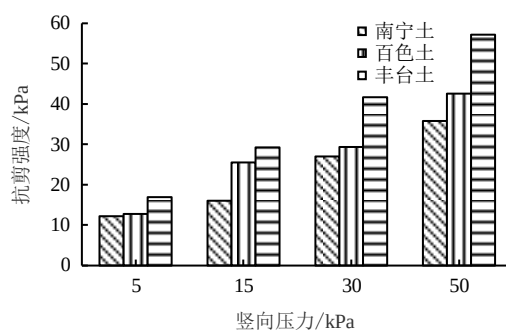


图7 循环0次的抗剪强度对比

Fig.7 Comparison of shear stress with 0 wet-dry cycle

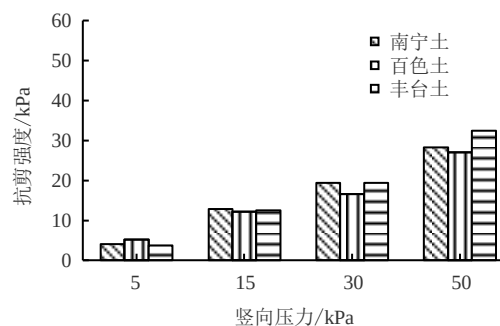


图8 循环6次的抗剪强度对比

Fig.8 Shear strength comparison of 6 wet-dry cycles

5 结论

(1) 为探究膨胀土坡常浅层坍塌的基本原因,有必要开展有荷干湿循环含低应力条件的抗剪强度试验,而其中选取代表性土样并改进试样制备及施剪条件以更好模拟真实工况非常关键。

(2) 丰台沉积型蓝灰色膨胀泥岩(土)两微观指标与自由膨胀率测试结果如此不相符尚为首次发现,是偶然现象还是可接受的事实值得继续研讨。

(3) 直剪试验中竖向压力对强度的影响显著,增大上覆压力能有效抑制干湿循环过程中同一膨胀土样的强度绝对衰减率;无论高、低应力段,实测黏聚力随干湿循环数的衰减可用指数函数描述,而内摩擦角的变化较小,且降幅不大。

(4) 膨胀土抗剪强度非线性特征宜用分段双直线来表征,做边坡稳定分析时,其参数 c 、 φ 值应根据可能滑面深度在相应段强度线上获取。

(5) 外部气候环境条件一致时,不同成因和类型的膨胀土经相同的多次干湿循环作用后,低应力条件下各土体的最终抗剪强度会降至同一幅值范围;正是受干湿循环反复作用的上部土层 c 值的严重衰减,导致了边坡的浅层坍塌。

参考文献

- [1] 郑健龙, 杨和平. 膨胀土处治理论、技术与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
ZHENG Jian-long, YANG He-ping. Theory and practice of expansive soil treatment technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [2] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
LIU Te-hong. Problems related to expansive soil in engineering constructions[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.

- [3] 王星运, 陈善雄, 梅涛, 等. 膨胀土边坡稳定性参数影响分析[J]. 工程勘察, 2010, 1(增刊): 509—515.
WANG Xing-yun, CHEN Shan-xiong, MEI Tao, et al. Analysis on stability of expansive soil slope influenced by parameters[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2010, 1(Supp.): 509—515.
- [4] 殷宗泽, 徐彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 454—459.
YIN Zong-ze, XU Bin. Slope stability of expansive soil under fissure influence[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(3): 454—459.
- [5] 吴珺华, 杨松. 干湿循环下膨胀土基质吸力测定及其对抗剪强度影响试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 678—684.
WU Jun-hua, YANG Song. Experimental study of matric suction measurement and its impact on shear strength under drying-wetting cycles for expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(3): 678—684.
- [6] 程展林, 李青云, 郭熙灵, 等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(10): 102—111.
CHENG Zhan-lin, LI Qing-yun, GUO Xi-lin, et al. Study on the stability of expansive soil slope[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2011, 28(10): 102—111.
- [7] 肖杰, 杨和平, 李晗峰, 等. 低应力条件下不同密度的南宁膨胀土抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 15—21.
XIAO Jie, YANG He-ping, LI Han-feng, et al. Shear strength test of Nanning expansive soil with various dry densities and low stresses[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2013, 26(6): 15—21.
- [8] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797—3802.
LÜ Hai-bo, ZENG Zhao-tian, ZHAO Yan-lin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3797—3802.
- [9] 杨和平, 肖夺. 干湿循环效应对膨胀土抗剪强度的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然版), 2005, 2(2): 1—6.
YANG He-ping, XIAO Duo. The influence of alternate dry-wet effect on the strength characteristic of expansive soils[J]. **Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)**, 2005, 2(2): 1—6.
- [10] 杨和平, 王兴正, 肖杰. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 949—954.
YANG He-ping, WANG Xing-zheng, XIAO Jie. Influence of wet-dry cycles on strength characteristics of Nanning expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(5): 949—954.
- [11] 曲永新, 等. 中国膨胀土黏土矿物组成的定量研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(增刊): 416—422.
QU Yong-xin, Quantitative study on clay mineral composition of expansive soils in China[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2002, 10(Supp.): 416—422.
- [12] 杨和平, 曲永新, 郑健龙. 宁明膨胀土研究的新进展[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 981—987.
YANG He-ping, QU Yong-xin, ZHENG Jian-long. New development in studies on Ningming expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(7): 981—987.
- [13] 交通部公路科学研究院. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG E40—2007 Test methods of soil for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [14] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936—1941.
YANG He-ping, ZHANG Rui, ZHENG Jian-long. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(11): 1936—1941.
- [15] PERRY J. A Technique for defining non-linear shear strength envelopes and their incorporation in a slope stability method of analysis[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 1994, 27(3): 231—241.
- [16] POUL V L. The mechanics of surficial failure in soil slopes[J]. **Engineering Geology**, 2010, 114: 57—64.
- [17] 杨和平, 赵鹏程, 郑健龙. 膨胀土填料改进 CBR 试验方法的提出与验证[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1751—1757.
YANG He-ping, ZHAO Peng-cheng, ZHENG Jian-long. Suggestion and verification on modified CBR test method for expansive soils fill[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(12): 1751—1757.
- [18] 肖杰, 王兴正, 杨和平. 南宁外环膨胀土抗剪强度非线性特征及影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(10): 1—7.
XIAO Jie, WANG Xing-zheng, YANG He-ping. Analysis of nonlinear characteristics of shear strength of Nanning expansive soil and its influencing factors[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2014, 27(10): 1—7.