

DOI: 10.11779/CJGE201405020

干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响

杨和平, 王兴正, 肖杰

(长沙理工大学特殊土工程研究所, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对膨胀土边坡滑坍多呈浅层破坏的现状, 选取南宁外环膨胀土原状样与重塑样开展对比试验, 精心设计试验方案, 改进常规直剪试样制备条件和试验方法, 使模拟土体季节性干缩湿胀过程更接近实际, 探究了2种土样经历多次干湿循环作用后抗剪强度的衰减规律。结果表明: 试样制备中有上覆荷载作用, 实测土样经历同样干湿循环次数后的强度衰减幅度比无荷条件下的小, 再次验证荷载对抑制强度衰减作用明显; 不管原状还是重塑样经干湿循环后的强度衰减主要是 c 值大幅降低, 其 φ 值虽也减小但降幅都不大; 此外, 计入边坡浅层破坏时滑面的低应力条件开展试验并分析测试结果, 得到做边坡浅层稳定性分析时合理的抗剪强度参数, 研究结果可供工程设计参考。

关键词: 膨胀土; 干湿循环; 抗剪强度; 衰减; 边坡滑坍; 浅层破坏

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)05-0949-06

作者简介: 杨和平 (1954-), 男, 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。

Influence of wetting-drying cycles on strength characteristics of Nanning expansive soils

YANG He-ping, WANG Xing-zheng, XIAO Jie

(Institute of Special Soil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Since most of expansive soil slopes exhibit shallow landslide, undisturbed and remoulded expansive soils of Nanning outer ring are specially selected to carry out contrast tests. Through the well-designed test program, by improving the conventional sample preparation conditions and methods of direct shear tests, laboratory simulation of soils under seasonal drying shrinkage and wetting expansion is made closer to the actual situation. Meanwhile, the rules of strength reduction of the two kinds of soil samples subjected to wetting-drying cycles are studied. The results show that the strength reduction ratio of the soil samples with loading is smaller than that of the soil samples without loading after experiencing the same wetting-drying cycles, which verifies that the loading has an obvious inhibitory effect on the shear strength reduction. Whether it is undisturbed or remoulded samples, the strength reduction is mainly owing to the decrease of c after experiencing wetting-drying cycles and the reduction of φ is not obvious. Moreover, taking the low stress of slope shallow layer sliding into consideration when conducting tests, by analyzing the test results, reasonable shear strength parameters can be determined to analyze the stability of shallow slope. The research conclusions can be used for reference in engineering design.

Key words: expansive soil; wetting-drying cycle; shear strength; reduction; slope landslide; shallow failure

0 引言

膨胀土边坡破坏的浅层性问题一直以来备受关注, 并吸引了不少专家学者进行不断的研究。除具一般非饱和土的基本性质外, 膨胀土的强度特性还极易受到季节气候变化的干湿循环影响。众所周知, 边坡的稳定性很大程度取决于土的抗剪强度, 膨胀土因富含亲水性黏土矿物而吸水膨胀软化, 失水收缩开裂, 其强度呈现较复杂的变动特性^[1-2]。本文以南宁外环高速公路工程为依托, 室内模拟南宁膨胀土的季节性干缩湿胀条件, 测试含低应力的抗剪强度并做理论分析,

研究其干湿循环效应下的强度特性。

许多学者通过不断改进试验方法和控制试验条件以期获得更为真实可靠的膨胀土抗剪强度参数, 主要从含水率、裂隙性、超固结性以及干湿循环作用等方面着手探究其强度的衰减并找寻原因^[3-4]。已有考虑干湿循环作用的强度试验方法, 在土样干湿循环过程模拟的具体条件和操作上就存在一定差别, 文献[5]所用

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50978035); 交通部科技项目 (2009353311060); 广西交通科技项目 (2011-20)

收稿日期: 2013-08-08

表 1 膨胀土的基本性质指标
Table 1 Characteristic indices of expansive soils

比重 G_s	液限	塑限	塑性 指数 I_p	颗粒组成/%				蒙脱 石含 量/%	比表 面积 $/(m^2 \cdot g^{-1})$	自由膨 胀率 $\delta_{ef}/\%$	黏土矿物相对含量/%			
	$w_L/\%$	$w_p/\%$		>0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	<0.005 mm	<0.002 mm				I/S	I	K	C
2.7	46.04	23.77	22.27	0.30	56.14	43.56	42.29	11.78	105.53	62	58	11	20	11

的吸湿方式是真空抽气饱和法，文献[6，7]中则采取喷雾器连续在试样上喷水，且该喷水吸湿方式是现开展干湿循环试验时用得最多的方法，但它并不太符合膨胀土工程的实际情况。由于此法加湿土样连续吸水的过程中无上覆荷载的作用，导致试样吸水时直接发生自由膨胀，而实际边坡坍塌时滑面到坡面总有一定厚度，即处于一种不同上覆土压的作用条件，滑面土的吸湿变形与自由膨胀效应显然存在差异。因此，进行抗剪强度试验时膨胀土样在制备过程中模拟吸湿的条件需作出改进。

此外，正常地质构造条件下大多数膨胀土边坡的失稳破坏为浅层滑动，不少滑面的深度不超过 2 m，其上实际受到的竖向压力往往低于 50 kPa，而现规范的常规直剪试验方法，试件施测时可供选取的最小压力为 50 或 100 kPa，这与边坡实际发生破坏的条件也不相符。因此，为获得膨胀土坡破坏时真实抗剪强度，进行直剪时试件的上覆压力设定需包含低应力级位，且已有研究^[8-10]得出计及低应力试验条件，膨胀土的“三性”特征会更为明显，其低应力段测得的抗剪强度线往往呈曲线状。目前，标准的试验仪器不能与之配套，故考虑低应力条件的膨胀土抗剪强度试验研究还较少见。本文的试验设计中，特意增加了 5，15，30，50 kPa 四级低压力（应力）荷载，对南宁外环膨胀土开展干湿循环剪切试验，以期获得做边坡稳定性分析时的合理强度参数供工程设计参考。

1 试验用土及方案设计

1.1 试验用土

土样取自南宁外环高速公路五塘互通中线（K24+000）深 2~3 m 处，其天然含水率约为 17.0%，干密度约为 1.70 g/cm³。表 1 给出该膨胀土基本土性测试结果。由于其自由膨胀率为 62%，蒙脱石含量和比表面积均属于中等，可将它定为中膨胀土。

1.2 制样及试验方案

(1) 试样制备

原状土：将所取南宁外环的原状土样运回实验室，选用直径为 61.8 mm、高为 20 mm 的钢环刀，在其内壁涂一薄层凡士林后刃口向下放到原状土上垂直下压，边压边削、均匀用力。切样时注意尽量顺着其原

有层理结构，若遇内含化石贝壳类杂质的土样应废弃。

重塑样：自然风干取回实验室的扰动膨胀土，将其碾碎过 2 mm 筛，按 17.0% 的含水率要求配制成湿土，经闷料 24 h 后测得土样的最终含水率在±0.5% 范围内变动。制样采取静压法，控制干密度为 1.70 g/cm³，制备重塑样若干，其误差限制在±0.02 g/cm³ 以内。

(2) 干湿循环试验方案

设计 2 套不同的土样干湿循环方案：一是常规法，此法在试样吸水过程中不加上覆荷载；另一种则在试样吸水时施加相应的上覆压力。

a) 无荷干湿过程

每组需 8 个原状土样和 8 个重塑土样，共使用了 5 组原状样和 4 组重塑样。如图 1 所示，在试样上、下面各用一张滤纸和一块直径 79.8 mm 的透水石覆盖，以防止土样吸水膨胀后引起土粒散落；将所有试样置于一大的无盖玻璃盒中，盒底预存一定量的水，让水面刚好与下透水石平高；用微型喷雾器在试样上表面的透水石上连续喷水实现加湿过程，每天喷洒 4 次，每次都到试样不再吸水为止，这样喷水 3 d 后的试样可达到吸水饱和。将饱和后的试样称重并放入烘箱中，设定其温度为 40℃（模拟自然条件下的最高气温），放置 24 h 后再称重，如此即完成 1 次干湿循环过程。对应该设计方案，5 组原状土样分别实施的干湿循环次数为 0，2，4，6，8 次；4 组重塑样分别实施 0，2，4，6 次干湿循环。



图 1 干湿循环无荷饱和

Fig. 1 Wetting-drying cycle saturation without loading

b) 有荷干湿过程

每组 8 个重塑样，共用 3 组。同样每个试样上、下面各放一张滤纸和一块透水石，取每组样中的 5 个置于水槽中，分别施加 5，15，30，50 和 75 kPa 荷载

(见图 2), 注水于槽内至与试样上透水石持平, 静置 3~4 d 使试样吸水饱和; 每组中另 3 个样采用 24 h 真空饱和和增湿, 按饱水后试样的膨胀力约 100 kPa 控制其在饱和过程中体积不变。试样的干燥过程也在烘箱内完成, 将两种方法饱和的试样称重, 放入控温 40℃ 的烘箱中 24 h 后再称重, 即完成 1 次干湿循环。无论有、无荷载作用, 0 次循环样的测试结果都应相同, 故干湿循环数只设定了 2, 4, 6 次。

c) 试验方法及低应力施加

将完成拟定干湿循环次数的试样充分饱水, 逐个进行慢剪测定其抗剪强度, 采取 0.02 mm/min 的剪切速率, 施加的竖直压力分别为 5, 15, 30, 50, 75, 100, 200, 300 kPa 共 8 级。因施测仪器为南京土壤仪器厂生产的常规直剪仪, 故 5, 15, 30 kPa 这 3 级低应力采取直接施加等效荷载, 其余常规压力仍通过杠杆配重来施加。文中的低应力是指 5, 15, 30 和 50 kPa 四级荷载。



图 2 干湿循环有荷饱和

Fig. 2 Wetting-drying cycle saturation with loading

整个剪切试验的实施步骤及要求均严格按公路土

工试验规程 (JTG E40—2007) [11] 执行。
本次试验采用慢剪, 表 2 给出本次试验的设计方案。

表 2 试验设计方案

Table 2 Test programs

序号	土样类型	干湿循环次数	竖直压力/kPa
1	无荷干湿过程原状样	0, 2, 4, 6, 8	5, 15, 30,
2	无荷干湿过程的重塑样	0, 2, 4, 6	50, 75, 100,
3	有荷干湿过程的重塑样	2, 4, 6	200, 300

2 试验结果及分析

2.1 测试结果

原状样采取无荷干湿循环、重塑样采取 2 类干湿循环方案, 3 个系列的试样分别按设定干湿循环次数完成慢剪试验, 各组试验均包含低应力控制条件, 所得测试结果经整理后列入表 3。

2.2 试验结果分析

(1) 含低应力条件的合理性

由于规范中直剪试验不含低应力条件, 土样测试所得的抗剪强度指标内摩擦角 φ 和黏聚力 c 与本试验测出的结果存在差异, 考虑到文章篇幅, 仅取原状样开展有、无低应力条件的对比分析。按规范法先对竖直应力大于 50 kPa 的 4 个测点值做直线拟合, 得库仑公式下的抗剪强度直线, 并据以计算各个低应力点 (4 种竖直应力) 相应的剪应力, 同时列出 4 个剪应力实测值做比较, 结果见表 4。

表 3 抗剪强度试验结果

Table 3 Results of shear strength tests

kPa

施剪时 竖直 应力	无荷干湿过程原状样					无荷干湿过程的重塑样				有荷干湿过程的重塑样		
	循环次数					循环次数				循环次数		
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	2	4	6
5	31.03	18.96	10.43	6.86	5.52	12.21	6.00	3.62	3.02	7.93	5.52	4.14
15	38.10	29.56	20.93	17.56	14.09	16.00	11.26	10.09	9.45	13.74	13.56	12.87
30	50.08	34.17	30.02	26.67	25.50	27.01	17.84	15.67	14.28	22.34	20.67	19.34
50	56.01	50.25	38.94	33.45	31.98	35.77	28.10	24.29	22.34	32.00	30.10	28.29
75	70.94	60.85	53.25	50.27	47.37	45.60	36.82	34.17	30.78	40.98	37.72	37.02
100	87.80	81.18	65.08	58.36	51.44	55.64	48.14	44.43	42.18	50.80	47.85	47.50
200	137.52	123.95	108.82	101.01	96.49	95.09	83.51	79.66	77.44	90.59	87.00	84.78
300	193.72	170.68	152.44	138.48	137.98	140.69	126.60	122.43	120.13	133.03	129.56	128.69

表 4 原状土低应力下剪应力实测值与对应计算值

Table 4 Comparison between measured and calculated shear stresses under low stress

竖直应力 /kPa	剪应力实测值/kPa					剪应力计算值/kPa				
	干湿循环次数					干湿循环次数				
	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
5	31.03	18.96	10.43	6.86	5.52	34.52	31.78	22.92	21.95	15.44
15	38.10	29.56	20.93	17.56	14.09	39.91	36.51	27.32	25.92	19.59
30	50.08	34.17	30.02	26.67	25.50	47.97	43.60	33.91	31.88	25.81
50	56.01	50.52	38.94	33.45	31.98	58.71	53.05	42.70	39.83	34.10

对比分析表 4, 以 2 次干湿循环为例, 上覆压力 5, 15, 30, 50 kPa 时的实测值分别是 18.96, 29.56, 34.17, 50.52 kPa, 而按规范拟合式算得的对应值是 31.78, 36.51, 43.60, 53.05 kPa, 分别为实测值的 1.71, 1.24, 1.28, 1.05 倍; 再比对 6 次干湿循环的结果, 得计算值分别是实测值的 3.20, 1.48, 1.20, 1.19 倍。显而易见, 在误差允许范围内用规范法拟合确定的低应力段抗剪强度远大于实测值, 且上覆压力越小相差越大。因而按规范方法开展直剪试验并做分析将得不到膨胀土坡浅层破坏时滑面的真实抗剪强度。

进一步比较实测土体高、低应力段的强度, 依规范对竖直应力大于 50 kPa 的 4 个测点进行库仑公式拟合, 同时将竖直应力 75 kPa 内的 5 个测点做直线拟合, 得干湿循环 6 次原状样的分段式强度折线 (图 3)。此外, 分析整理 3 系列试验高、低应力段各自的 c , φ 值 (见表 5), 不难看出, 同一土样经历不同干湿循环次数后的低、高应力段强度指标相差较大, 且循环次数越多越明显。鉴于膨胀土坡破坏的浅层性特点, 做膨胀土强度试验时必须含低应力条件, 才能测出符合实际且满足工程设计要求的指标值。

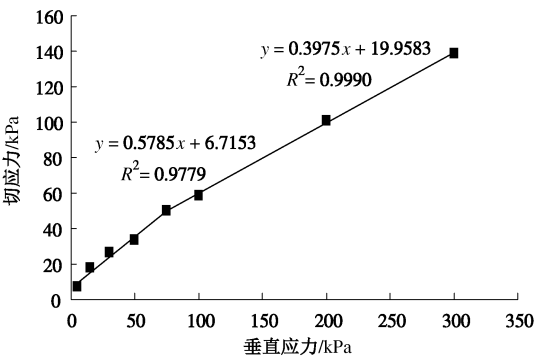


图 3 原状土干湿循环 6 次的分段式强度线

Fig. 3 Curve of shear strength of undisturbed soils after 6 wetting-drying cycles

(2) 干湿循环后原状土强度衰减分析

根据表 5, 以干湿循环次数为横坐标, 以内摩擦角 φ 和黏聚力 c 为纵坐标, 分别绘制出高、低应力段两参数随循环次数的变化曲线 (见图 4)。

由图 4 可知, 整体上原状样的 c , φ 值呈现随干湿循环次数增加而减小的趋势, 尤其高应力段两指标均循此规律变化, 相比之下 c 值降幅更大; 而低应力

段随循环次数增多 φ 值基本不变, 8 次循环后的 c 值则降至初始值的 1/6。有研究^[12]已指出, 正是 c 值的急剧降低导致了膨胀土堑坡的浅层坍塌破坏。

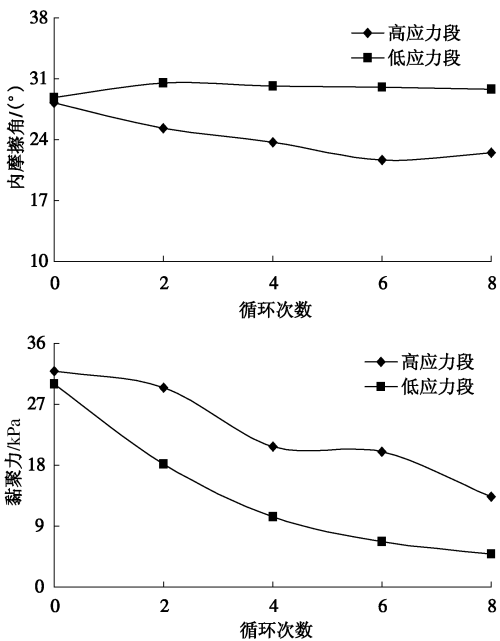


图 4 原状土抗剪强度指标与干湿循环次数的关系

Fig. 4 Relationship between shear strength parameters and wetting-drying cycles of undisturbed soils

此外再分析表 5, 可发现两土样随循环次数其强度值的变化规律: 重塑样未经干湿循环的 c , φ 值 (22.81°, 13.30 kPa) 与原状样经 8 次循环的 c , φ 值 (22.51°, 13.37 kPa) 相当接近, 可推断重塑样的初始强度与经历多次干湿循环、结构完全破坏的原状样强度相差无几, 这是因为重塑样失去了原土的结构构造性及土粒间的物理化学胶结作用而强度大降, 也可用膨胀土的超固结性、裂隙性为何导致开挖边坡极易坍塌来解释。当然该推论还需用更多膨胀土样采用相同的试验加以验证, 但由此可知: ①南宁外环项目施工期间开挖膨胀土坡不宜出露过久, 否则几经干湿循环后极易坍塌; ②分析膨胀土坡的长期稳定性宜用干湿循环重塑样的 c , φ 值; ③实测重塑样的强度不能代表刚开挖膨胀土边坡的真实强度, 因此 c , φ 测试值偏小。

表 5 不同干湿循环次数高、低应力段抗剪强度指标

Table 5 Shear strength parameters of high and low stresses with different wetting-drying cycles

应力段	强度指标	干湿循环次数												
		原状土					有荷干湿过程的重塑样				无荷干湿过程的重塑样			
		0	2	4	6	8	0	2	4	6	0	2	4	6
高应力段	$\varphi/(^{\circ})$	28.24	25.30	23.73	21.68	22.51	22.81	22.22	22.12	21.98	22.81	21.45	21.20	21.36
	c/kPa	31.86	29.42	20.72	19.96	13.37	13.30	9.92	6.91	6.38	13.30	7.45	4.73	1.65
低应力段	$\varphi/(^{\circ})$	28.84	30.52	30.19	30.05	29.79	26.04	25.38	24.27	24.37	26.04	23.96	23.08	21.10
	c/kPa	29.96	18.13	10.35	6.72	4.90	10.22	6.79	5.73	4.48	10.22	4.45	2.65	2.47

表 6 不同干湿次数、不同荷载下试样的抗剪强度及绝对衰减率

Table 6 Shear stress and reduction ratio of remoulded soils with different wetting-drying cycles and loadings													
垂直 压力 /kPa	τ_0 /kPa	有荷干湿过程的重塑样						无荷干湿过程的重塑样					
		τ_2 /kPa	τ_4 /kPa	τ_6 /kPa	$\Delta_{2,j}/\%$	$\Delta_{4,j}/\%$	$\Delta_{6,j}/\%$	τ_2 /kPa	τ_4 /kPa	τ_6 /kPa	$\Delta_{2,j}/\%$	$\Delta_{4,j}/\%$	$\Delta_{6,j}/\%$
30	27.01	22.34	20.67	19.34	17.29	23.47	28.40	17.84	15.67	14.28	33.95	41.98	47.13
50	35.77	32.00	30.10	28.29	10.54	15.85	20.91	28.10	24.29	22.34	21.44	32.09	37.55
100	55.64	50.80	47.85	47.50	8.70	14.00	14.63	48.14	44.43	42.18	13.48	20.15	24.19
200	95.09	90.59	87.00	84.78	4.73	8.51	10.84	83.51	79.66	77.44	12.18	16.23	18.56

(3)干湿循环方式对重塑样强度绝对衰减率的影响

为定量分析有荷与无荷条件、不同干湿循环次数下重塑样的强度变化规律（抗剪强度 τ_i 的衰减幅度），给出强度绝对衰减率 $\Delta_{i,j}$ 定义：

$$\Delta_{i,j} = \frac{|\tau_i - \tau_0|}{\tau_0} \times 100\% \quad , \quad (1)$$

式中， i 为干湿循环次数， j 为施剪时试样所受压力， τ_0 ， τ_i 为试样 0， i 次循环时的抗剪强度。

为使问题更明晰，分别选低应力段 30，50 kPa 和高应力段 100，200 kPa 各两压力值做分析，结果见表 6。

按表 6 中数据作图 5，6，可直观地看到制样干湿过程中有上覆荷载作用的强度衰减率比无荷的至少小 1/3，再次证实荷载对膨胀土干湿循环过程中强度衰减的抑制作用明显^[13]；上覆荷载越大强度衰减越小，且同一级压力下土样随循环次数增多其强度不断衰减，但前 2 次的衰减增速较快，后续循环的衰减幅度变小。这种规律也是膨胀土的基本性质所致：膨胀土吸湿体积膨胀受阻时产生膨胀力，荷载能抵消相应膨胀力使其体胀变小，当施加的荷载大于土的膨胀力时将不会发生体胀，而较密实的膨胀土体渗透性（吸湿能力）降低，相应的干密度变化小，其抗剪强度衰减也就减小。

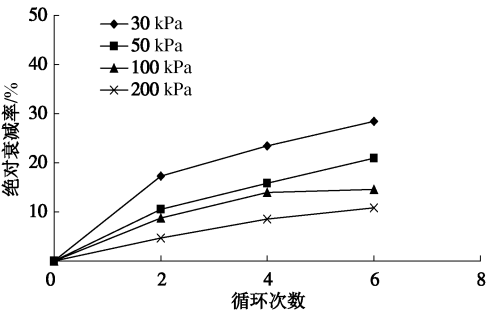


图 5 有荷干湿过程的重塑样绝对衰减率

Fig. 5 Reduction ratio of remoulded soils wetting-drying cycles with loading

(4) 2 种制样方法的实测抗剪强度参数对比

为方便对采用 2 种制样方法的实测 c ， φ 值随干湿循环次数变化做定量分析，取表 5 中重塑样的低应

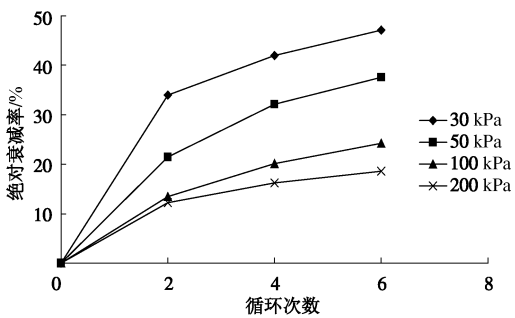


图 6 无荷干湿过程的重塑样绝对衰减率

Fig. 6 Reduction ratio of remoulded soils during wetting-drying cycles without loading

力段数据作出比较如图 7 所示，显而易见，制样时无上覆荷载作用试样的强度值衰减比有上覆荷载作用的大得多。相对而言，无论有荷与无荷干湿过程的重塑样，其黏聚力比内摩擦角的绝对衰减要大，经 6 次干湿循环后有荷样的黏聚力降幅为 56%，无荷样的黏聚力降幅更高达 76%；而 6 次干湿循环后有荷样的内摩擦角降幅仅 6%，无荷样内摩擦角的降幅也只 19%，所得分析结果恰与文献[3]中的研究结论吻合。

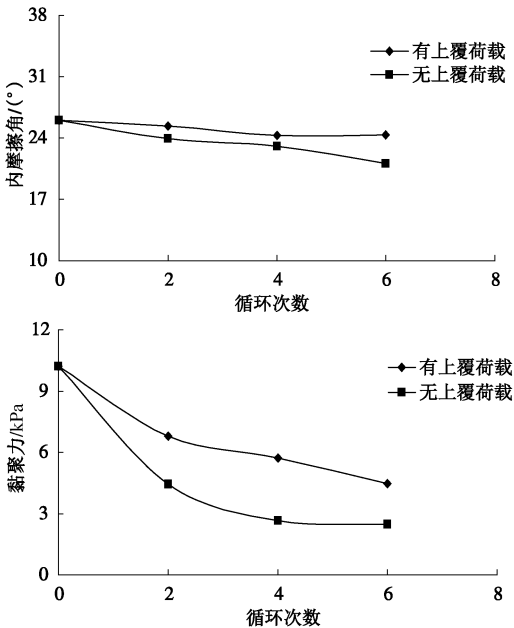


图 7 有荷与无荷干湿过程的重塑样抗剪强度参数对比

Fig. 7 Comparison of shear strengths of remoulded soils during wetting-drying cycles with loading or unloading

3 结 论

(1) 为研究膨胀土边坡浅层滑坍破坏规律,开展含低应力条件土样在干湿循环影响下的抗剪强度试验很有必要,而其中改进试验方案和控制施测条件以更好模拟真实工况非常关键。

(2) 现行规范规定的剪切试验方法得不到膨胀土坡浅层破坏时滑面的实际抗剪强度,做边坡稳定分析时,根据可能滑面深度选取相应低应力段的抗剪强度指标值,更容易获得符合实际的结果。

(3) 南宁膨胀土无论原状还是重塑样,多次干湿循环后抗剪强度均明显降低,原状样8次循环实测 c , ϕ 值相当于其重塑样的初始 c , ϕ 值,因此研究路堑边坡的稳定性需按长期或新开挖边坡的稳定确定试验方法和控制条件以测得合理的强度参数。

(4) 经历干湿循环作用后膨胀土的强度衰减主要是黏聚力大幅降低,其内摩擦角虽也减小,但不管是原状还是重塑样其降幅都不是很大。

(5) 干湿过程中有荷条件制备膨胀土样,其抗剪强度衰减比无荷时小得多。荷载能抑制干湿循环下的强度衰减;上覆荷载越小,其干湿循环强度衰减越大,这就是膨胀土坡常浅层坍滑的原因之一。

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. (in Chinese))
- [2] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984. (LIAO Shi-wen. Expansive soil and railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [3] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 727 - 731. (LIU Hua-qiang, YIN Zong-ze. Test study of influence of crack evolution on strength parameters of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 727 - 731. (in Chinese))
- [4] 徐 彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的实验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 44 - 50. (XU Bin, YIN Zong-ze, LIU Shu-li. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 44 - 50. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 张锦锦. 干湿循环条件下胀缩性土强度的试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011. (ZHANG Jin-jin. Experimental research on strength of swell-shrink soil in wetting-drying cycle condition[D]. Nanning: Guangxi University, 2011. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] POUL V L. The mechanics of surficial failure in soil slopes[J]. Engineering Geology, 2010, **114**: 57 - 64.
- [10] 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-ling, et al. Study on the stability of expansive soil slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, **28**(10): 102 - 111. (in Chinese))
- [11] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 2007. (JTG E40—2007 Test methods of soil for highway engineering[S]. 2007. (in Chinese))
- [12] GEO-SLOPE International Ltd. Stability Modeling with Slope/W 2007 Version[M]. 4th ed. Canada: GEO-SLOPE International Ltd, 2008.
- [13] 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. (in Chinese))