DOI: 10.13718/j. cnki. xdzk. 2016. 09. 025

干湿循环对风化砂改良膨胀土无荷膨胀率的影响。

杨 俊^{1,2}, 刘世宜^{1,2}, 张国栋^{1,2}, 唐云伟³

1. 三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心,湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 宜昌市交通运输局, 湖北 宜昌 443002

摘要:对掺砂改良后的膨胀土进行了干湿循环作用下的无荷膨胀率试验,研究了试样的无荷膨胀率(绝对膨胀率)、 相对膨胀率以及终止吸水量随干湿循环次数的变化规律,深入分析了不同干湿循环次数后,改良膨胀土的膨胀量 随浸水时间的增长特征.试验表明:1)无荷膨胀率以及终止吸水量随干湿次数的增长变化规律基本一致,在相同的 风化砂掺量下,无荷膨胀率呈3次函数形式降低,且无荷膨胀率在第2~3次干湿循环后,降低幅度较大,之后降 低幅度逐渐减小,最后基本趋于稳定;2)掺风化砂对抑制无荷膨胀的发生效果不大,当风化砂由0增至50%时, 无荷膨胀率降低幅度较小,且这一降低幅度随着干湿循环次数的增大为逐渐减小;3)无荷膨胀量在浸水1h内的 增长速度较快,之后逐渐变缓,在相同的风化砂掺量下,无荷膨胀量达到稳定时的时间随着干湿循环次数的增加而 逐渐缩短.

关 键 词:膨胀土;干湿循环作用;风化砂;无荷膨胀率;终止吸水量;增长时程

中图分类号: TU443 文献标志码: A 文章编号: 1673-9868(2016)09-0159-07

膨胀土是在特殊的地质作用下形成的一种典型非饱和土,在我国西南、中南、华东和华北等地区分布 广泛.膨胀土具有吸水膨胀、失水收缩的典型水敏特征以及高塑性、裂隙性、崩解性等不良工程特性^[1].膨 胀土对环境的干湿交替变化极为敏感,大量工程实践表明,干湿循环作用是引发膨胀土路基病害的主要原 因之一,当其用作路基填料时,在反复的干湿交替过程中极易造成一些严重的路基病害,比如路基波浪变 形、路面溅浆冒泥、路堤沉陷纵裂^[2]等.

膨胀土在有侧限、无垂直荷载的条件下充分吸水膨胀后,试样高度膨胀量与初始高度之比,称为无 荷膨胀率,是衡量土体膨胀潜势的重要指标之一.许多学者对干湿循环后膨胀土无荷膨胀率的变化规律 进行了大量的研究,吴珺华等^[3]通过对膨胀土进行了无荷条件下的干湿循环胀缩试验,发现随着干湿循 环次数的增加,无荷膨胀率的大小及达到稳定所需的时间逐渐减小,且在干湿循环1次时,无荷膨胀率 的降低幅度最大.赵艳林等^[4]对南宁膨胀土进行了室内干湿循环胀缩试验,发现试样的无荷膨胀率随着 干湿循环次数的增加呈指数函数降低,得到了无荷膨胀率 y 与循环次数 x 之间的关系式: y = 27.766e^{-0.0887x}.杨成斌等^[5]通过试验研究了干湿循环作用对石灰改良膨胀土无荷膨胀率的影响,发现 在干湿循环作用下,膨胀土的无荷膨胀率呈现增大的趋势,且当干湿循环次数为 3~13次时,无荷膨胀 率的增长幅度最大.而目前,大多研究仅限于原状或扰动膨胀土,对于改良膨胀土的无荷膨胀率在干湿 循环作用下变化规律的研究并不多见.

目前,在路基工程中,膨胀土的改良方法多为化学改良法,利用改良材料(石灰、水泥、粉煤灰等)对膨胀土进行不良工程特性的改良^[6],改良效果较好,但是化学改良在拌合时存在改良材料与膨胀土难以拌合

① 收稿日期: 2014-01-03

基金项目: 湖北省教育厅自然科学研究重点项目(D20131304).

作者简介:杨 俊(1976-),男,博士,副教授,湖北武汉人,主要从事道路特殊土路基处理,路面新材料开发与利用,建筑垃圾与工业 垃圾的路用特性研究.

均匀的问题,同时对施工人员的健康也带来了一定的影响.鉴于以上问题,本文拟采用掺风化砂这一物理 手段来对膨胀土进行改良,通过一系列的室内无荷膨胀率试验,深入探究了干湿循环作用对风化砂改良膨 胀土无荷膨胀率的影响,为膨胀土改良技术提供参考.

1 试验材料

1.1 膨胀土

试验用土为取自湖北宜昌小溪塔一鸦鹊岭一级公路 K25 段的灰白色膨胀土^[7],根据规范进行基本物理 指标的测定,试验结果如图 1 及表 1 所示,根据规范中相关的膨胀土等级的判别标准可知,试验所用膨胀 土的膨胀性较弱.

表 1 膨胀土基本物理力学性质指标

天然含水率/%	孔隙率/%	相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率/%
29.47	42.13	2.66	70.53	24.09	46.44	43.00

1.2 风化砂

试验所用风化砂的基本物理性质指标及粒度成分见表 2~表 3.

表 2 风化砂基本物理性质指标

天然含水率/%	相对密度	活性指数	液限/%	塑限/%	塑性指数
11.54	2.46	0.31	24.86	16.16	8.7

表 3 风化砂的粒度成分

颗粒直径/mm	百分含量/%
0.075~0.25	67.1
0.25~0.5	21.4
0.5~2	11.5

1.3 掺砂改良膨胀土

对掺砂改良后的土样进行重型击实试验,试验结果见图 2.



2 试验方案

本试验中试样的风化砂的掺量依次为 0,10%,20%,30%,40%和 50%.首先根据《公路土工试验规程》 (JTG E40-2007)中的要求,进行重型击实试验,确定不同风化砂掺量下改良膨胀土的击实指标(最大干密 度和最佳含水率),为无荷膨胀率试验的制样提供依参数^[8].

A. 干湿循环过程:干湿循环试样均采用静压法制备,试样尺寸: 61.8(直径) mm×20(高) mm. 将静

压好的试样放入图 3 所示的干湿循环夹具中拧紧螺栓固定后,置于恒温(20 ℃)水槽中浸水润湿直至试样吸水饱和.试样的干燥过程在烘箱中进行,烘箱的温度控制为 45 ℃,在干燥过程中,采用反复称量法,待试样含水率降至初始含水率时即停止干燥,这样即进行了 1 次干湿循环.重复上述步骤对试验进行反复的干湿,本研究中干湿循环次数分别为 0,1,2,3,4,5 次.

B. 无荷膨胀率试验: 在进行无荷膨胀率试验前, 将干湿循环一定次数后的试样密封一昼夜, 使试样内 部水分分布均匀. 无荷膨胀率试验采用南京土壤仪器厂生产的 WZ-2 型膨胀仪进行, 在试验过程中记录下 不同时刻试样的膨胀量并测量试样膨胀稳定时的含水率, 计算其吸水量的大小. 每组试验均进行 2 次平行 测定, 当两次试验结果的平行差值满足规范要求时, 取的算术平均值最为该试样的无荷膨胀率.



图 3 干湿循环夹具(左)与无荷膨胀率试验(右)

3 试验结果及分析

3.1 干湿循环过程对无荷膨胀率的影响

为了更加全面的分析干湿循环作用下掺砂改良膨胀土无荷膨胀率的变化规律,第*i*次干湿循环时试样的绝对膨胀率 δ_e 以及相对膨胀率 δ_e 定义如下:

$$\delta_{e} = \frac{Z_{i} - Z_{0}}{Z_{0}} \times 100\%$$
$$\delta_{ex} = \frac{Z_{i} - Z_{i-1}}{Z_{i-1}} \times 100\%$$

式中: Z_i 为第*i*次干湿循环后试样的高度(mm); Z_{i-1} 为第*i*-1次干湿循环后试样的高度(mm); Z_0 为试 样的初始高度(mm).

不同风化砂掺量下,第 i 次干湿循环后试样的绝对膨胀率 δ。见表 4.

表 4 第 *i* 次干湿循环作用后试样的绝对膨胀率

干湿循	风化砂掺量/%					
环次数	0	10	20	30	40	50
0	9.39	8.74	8.34	7.78	7.43	6.83
1	9.21	8.53	8.05	7.28	6.72	5.97
2	6.18	6.09	5.59	4.75	4.16	4.08
3	4.35	4.05	3.83	3.25	2.72	2.55
4	3.78	3.32	2.83	2.48	2.22	2.13
5	3.25	3.01	2.67	2.38	2.16	2.1

结合表 4 中的数据,分别以干湿循环次数和风化砂掺量为横坐标,以无荷膨胀率为纵坐标,得到了相同风化砂掺量下无荷膨胀率随干湿循环次数的变化曲线以及相同干湿循环次数下无荷膨胀率随风化砂掺量的变化曲线(图 4,图 5).



从以上图表可以看出:

1) 当风化砂掺量相同时,无荷膨胀率(下文中的无荷膨胀率均指的是绝度膨胀率)随着干湿循环次数 的增加总体上呈减小的趋势,当干湿 4~5 次数后,无荷膨胀率逐渐趋于稳定.

2)在一定的干湿循环次数下,风化砂掺量由0增至50%时,无荷膨胀率逐渐减小,但总的来说降低幅 度不大,其中干湿循环次数为1次、风化砂掺量为10%时,无荷膨胀率降低幅度最大,但也仅降低0.35%. 且从图5中可发现,当干湿循环次数逐渐增大时,随着风化砂掺量的增加,无荷膨胀率降低幅度逐渐减小, 干湿循环5次后,无荷膨胀率与风化砂掺量的关系曲线已接近一条水平的直线.这反映出干湿循环次数较 大时,掺风化砂对于抑制无荷膨胀率的效果并不明显.

3)随着干湿循环次数的增加,无荷膨胀率降低的幅度存在较大的差异.干湿循环1次时,无荷膨胀率 降低幅度较小,其中原状土的无荷膨胀率降低幅度最小,仅为0.18%.产生这一现象的原因是:在初次干 湿过程中,由于黏土矿物的流失量较少,故试样的膨胀性能降低不明显,另外在干湿循环作用下试样开始 出现裂隙,在进行无荷膨胀率试验时,土体中的黏土矿物可通过展开的裂隙更加充分的吸水膨胀^[9],因此 导致无荷膨胀率在第1次干湿循环作用时并没有明显的降低.同时可以发现,干湿循环1次时,随着风化 砂掺量的增加,无荷膨胀率的降低幅度也在逐渐增大.其中风化砂掺量为50%时,无荷膨胀率的降低量是 原状土的4.78倍.这是因为掺砂后,试样的孔隙率会逐渐增大,在干湿过程中,试样的结构性损伤加剧、 膨胀潜势降低,因此无荷膨胀率降低幅度逐渐增大.

4) 干湿循环 2~3 次时,无荷膨胀率开始急剧降低,各风化砂掺量下的无荷膨胀率降低幅度均占到了 总降低幅度的 70%以上,其中原状土的无荷膨胀率降低最为明显,达到了 4.86%.这是因为当干湿循环进 行至 2~3 次时,试样表面的裂隙数量显著增多,在外界水反复的进出过程中,亲水性矿物大量"失活",从 而有效亲水性矿物急剧减少,同时比表面积和可塑性减小^[10],试样的膨胀潜势迅速降低,最终造成了无荷 膨胀率的大幅减小.试样在经历 4~5 次干湿循环后,无荷膨胀率开始趋于稳定,这是由于多次干湿循环 后,裂隙数量基本不变,试样内部黏土颗粒的积聚和排列重新达到了新的平衡^[11],因此导致此时的无荷膨 胀率趋于稳定.

从图 4 中可以发现,同一风化砂掺量下,无荷膨胀率 δ_e 与干湿循环次数 i 呈较好的 3 次函数关系.因此,无荷膨胀率可以用如下公式来表示:

$$\delta_e = ai^3 + bi^2 + ci + d$$

式中: a, b, c, d 为与风化砂掺量有关的系数.

在相同的风化砂掺量下,掺砂改良膨胀土的相对膨胀率随干湿循环次数的变化规律如下图 6 所示.可 以看出相对膨胀率(下文中的相对膨胀率均指的是相对膨胀率的绝对值)随着干湿循环次数的增加先增大后 减小,其中干湿循环由 1 次增加至 2 次时,相对膨胀率急剧增大,其中原状土的相对膨胀率增长幅度最大, 达到了 2.61%;当干湿循环次数继续增大时,相对膨胀率开始逐渐减小,产生上述现象的原因在上文中均 已给出.

为定量分析不同干湿循环次数下试样膨胀稳定时吸水量的变化情况,定义第 i 次干湿循环后试样的终

止吸水量 ω_i 为:

$\omega_{i} = \omega_{i}^{\prime} - \omega_{0}$

式中: ω'_i 为第i次干湿循环后试样膨胀稳定时的含水率(%); ω_0 为试样的初始含水率(%).

表 5 不同风化砂掺量下的线性回归系数

风化砂掺量/			回归参数		
0/0	а	b	С	d	R^2
0	0.14	-0.87	-0.26	9.59	0.97
10	0.15	-1.00	0.14	8.87	0.94
20	0.14	-0.94	0.04	8.45	0.95
30	0.12	-0.71	-0.43	7.91	0.94
40	0.10	-0.55	-0.82	7.57	0.93
50	0.09	-0.47	-0.76	6.9	0.95

则不同干湿循环次数后,掺砂改良膨胀土的终止吸水量见图 7.可以发现:图 7 中终止吸水量与干湿循 环次数的关系曲线与图 4 中无荷膨胀率与干湿循环次数的关系曲线走势基本相同.在风化砂掺量相同的情 况下,干湿循环 1 次时试样的终止吸水量变化幅度较小,随着干湿循环的继续进行,终止吸水量开始呈先 出急剧降低的趋势,当干湿循环进行到 4~5 次时,终止吸水量趋于稳定.这是因为随着干湿循环的进行, 试样的有效黏土矿物含量逐渐减小,从而造成吸水量的相应减小,而黏土矿物的含量又决定着试样膨胀性 能的强弱,因此在一定的风化砂掺量下,随着干湿循环次数的增加,终止吸水量的变化情况与无荷膨胀率 的变化情况保持着高度的一致性.



图 6 相对膨胀率的绝对值与干湿循环次数的关系曲线

3.2 干湿循环过程对无荷膨胀率增长时程的影响

鉴于篇幅有限,以下仅以掺砂 0%,30%和 50%的改良膨胀土为例,研究不同干湿循环次数 下的无荷膨胀量随时间的增长规律,其试验结果 如图 8~图 10 所示.

对比图 8~图 10 的关系曲线可以发现:

 1)试样的膨胀量与浸水时间呈典型的非线性 关系,在浸水初期,膨胀量增长速度较快,且无荷 膨胀量的增长主要集中在浸水后1h内,1h后, 无荷膨胀量的增长速度逐渐变缓.

2)当风化砂掺量相同时,干湿循环1次后试 样的无荷膨胀率增长速度明显大于干湿循环其它



图 7 终止吸水量与干湿循环次数的关系曲线



次数后的增长速度,产生这一现象的原因是,干湿1次后,试样的膨胀潜势降低幅度较小,同时试样内 部随即会有裂隙的产生,裂隙的存在破坏了土颗粒间的相互粘结,导致对土颗粒吸水膨胀的束缚减弱, 同时形成的裂隙加快了外界水进入到土体内部的速度,黏土颗粒可以迅速的吸水膨胀^[12-16].但当干湿 交替继续进行时,试样的膨胀潜势降低幅度较大,因此即使裂隙数量明显增多,但无荷膨胀率的增长速 度却在逐渐降低.

3)当风化砂掺量相同时,无荷膨胀量达到稳定时所需的时间随着干湿循环次数的增加而逐渐减小.这同样是由于裂隙数量的逐渐增多和膨胀潜势的降低所造成的.对比图中的曲线可以发现,干湿循环4次和5次时的无荷膨胀量与时间的关系曲线较为接近,这说明在经历多次干湿循环作用后试样的膨胀性能已趋于稳定,达到了新的平衡.



6 结 论

1)在相同的风化砂掺量下,随着干湿循环次数的增加,无荷膨胀率呈减小的趋势,且在 2~3次干湿 循环时,无荷膨胀率降低幅度较大,当干湿循环进行到 4~5次时,无荷膨胀率基本趋于稳定.无荷膨胀率 与干湿循环次数之间满足 3次函数关系,且相关性较好.

2) 在相同的干湿循环次数下,无荷膨胀率随着风化砂掺量的增加而逐渐降低,但降低幅度不大,且随 着干湿循环次数的增加,无荷膨胀率的降低幅度在逐渐减小.

3) 在相同的风化砂掺量下,随着干湿循环次数的增加,终止吸水量的变化情况与无荷膨胀率的变化情况基本一致.

4)无荷膨胀量与浸水试件呈典型的非线性关系,当风化砂掺量相同时,无荷膨胀量达到稳定时所需的时间随着干湿循环次数的增加而逐渐减小,干湿循环进行至4~5次时,试样的膨胀性能趋于稳定,膨胀量与时间的关系曲线较为一致.

参考文献:

- [1] 陈爱军,张家生.石灰改良膨胀土的强度特性试验研究 [J]. 湖南工程学院学报(自然科学版),2010,20(2):63-67.
- [2] 刘莹莹,李明霞,黄志全.膨胀土在动静力学作用下的微观结构变化 [J].铁道建筑,2013(1):65-68.
- [3] 吴珺华,袁俊平,杨 松,等.干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J].水利水电科技进展,2013,33(1):62-65.
- [4] 赵艳林,曾召田,吕海波.干湿循环对膨胀土变形指标的影响 [J].桂林工学院学报,2009,29(4):470-473.
- [5] 杨成斌,查甫生,崔可锐.改良膨胀土的干湿循环特性试验研究 [J].工业建筑,2012,42(1):98-102.
- [6] 李 贤, 彭 贞, 汪时机, 等. 重塑膨胀土结构性损伤 CT—三轴试验研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(6): 131-135.
- [7] 杨 俊,黎新春,张国栋,等.不同掺量风化砂对宜昌市某公路膨胀土特性的影响研究 [J].中国工程科学,2012, 14(11):57-61.
- [8] 蒋晓庆,程 桦,卢 松,等.掺灰膨胀土的膨胀特性试验研究 [J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2009, 17(6):18-21.
- [9] 汪时机,孙世军,陈正汉,等.造孔损伤重塑膨胀土三轴剪切试验研究[J].西南大学学报(自然科学版),2011,33(3): 128-132.
- [10] 王建华,高玉琴.干湿循环过程导致水泥改良膨胀土强度衰减机理的研究 [J].中国铁道科学,2006,27(5):23-27.

- [11] 李 燕,高 明,魏朝富,等.紫色土水分一维水平运动的数值模拟 [J].西南大学学报(自然科学版),2006,28(4): 627-632.
- [12] 包惠明,魏雪丰. 干湿循环条件下膨胀土裂隙特征分形研究 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 478-482.
- [13] 张 龙,林先辉,刘 俏,等.秀山汞矿开采对当地土水环境的影响 [J].西南师范大学学报(自然科学版),2011, 36(6):105-109.
- [14] 赵艳林,曾召田,吕海波.大气作用下膨胀土地基的水分迁移与胀缩变形分析 [J]. 防灾减灾工程学报,2011,31(6): 659-665.
- [15] 冯国建, 沈 凡, 李丽蓉, 等. 根土复合体抗剪强度试验研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(7): 129-133.
- [16] 花 鹏,秦 帅,汪明武.可变模糊理论在合肥新桥机场膨胀土及改良土胀缩性评价中应用 [J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2011,19(5):1-4.

Wet and Dry Cycle Influence on Expansion Rate without Load of Weathered Sand Improved Expansive Soil

YANG Jun^{1,2}, LIU Shi-yi^{1,2}, ZHANG Guo-dong^{1,2}, TANG Yun-wei³

- 1. Collaborative Innovation Center of Geological Hazards and Ecological Environment in Three Gorges Area in Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China;
- 2. Civil and Architectural Institute, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China;
- 3. Yichang Transport Bureau, Yichang Hubei 443002, China

Abstract: By doing experiments of expansion rate without load to the mixed sand improved expansive soil under Wet and dry cycle, study the changing rules of specimen expansion rate without load (absolute expansion rate), the relative expansion rate and the termination water absorbing capacity with the variation number of wet and dry cycles, in-depth analysis of the various wet and dry cycles, the expansion rate of improved expansive soil's growth characteristics along with the soaking time. Experiments show that; 1) the changing rules of expansion rate without load and the termination water absorbing capacity are the same. With the same dosage of weathered sand, the expansion rate without load decreases in 3 times functional form, and in the 2 to 3 times wet and dry cycles, the reduce range is larger, then the range is smaller and smaller, and finally become basically stable; 2) mixed with weathered sand has little effect on the inhibition of swelling without load, when weathered sand's dosage increases from 0 to 50%, the reduce range of expansion rate without charge is quite small, and this reduce range gradually decreases with the number of cycles of wet and dry increasing; 3) when the soaking time is under 1 hour, the increasing speed of expansion rate without load is quite fast, then gradually slow down. With the same dosage of weathered sand, the time for expansion rate without load to stabilize gradually shortened with the increase in the number of Wet and dry cycle.

Key words: expansive soil; wet and dry cycle effects; weathered sand; expansion rate without load; termination water absorbing capacity; growth schedule

> 责任编辑 陈绍兰 实习编辑 包 颍