

文章编号:1671-6833(2016)04-0062-05

干湿循环条件下水泥改性膨胀土变形和强度试验

王建磊¹, 王艳巧², 杨广栋², 张扬帆², 姜宏雨²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 为了探究干湿循环作用对水泥改性膨胀土力学性质的影响, 以合肥地铁 1 号线太湖路车站基坑膨胀土为试验对象, 进行了不同水泥掺入比和不同养护龄期的水泥改性膨胀土直剪试验, 确定了最佳水泥掺入比以及最佳养护龄期. 在此基础上, 进行了干湿循环条件下膨胀土和水泥改性膨胀土的胀缩变形试验和直剪试验. 试验结果表明: 膨胀土的胀缩变形过程并不完全可逆, 随干湿循环次数的增多, 抗剪强度逐渐减小, 绝对胀缩率逐渐增大, 并最终趋于稳定; 水泥改性后的膨胀土抗剪强度明显提高, 水稳性显著提升, 胀缩性明显减弱; 经水泥改性后, 膨胀土受干湿循环作用的影响显著减小.

关键词: 干湿循环; 膨胀土; 水泥改性; 变形; 强度

中图分类号: TU443

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.014

0 引言

膨胀土是一种主要由强亲水性黏土矿物蒙脱石和伊利石组成的, 具有膨胀结构以及多裂隙性、强胀缩性和强度衰减性的高塑性黏土^[1-2]. 膨胀土吸水膨胀, 失水收缩, 在自然条件下极易发生反复干缩湿胀, 在含水率较低时具有很高的强度, 表现为质地坚硬, 然而一旦遇水湿化即发生膨胀变形, 且强度急剧下降^[3-4]. 因此, 膨胀土地基上的建筑物受到干湿循环作用而遭到破坏的工程事例屡见不鲜.

由于膨胀土的工程性质较差, 在工程实际中, 通常采用水泥、石灰等方式对膨胀土进行化学改性. 其中, 水泥改性膨胀土具有改性效果明显, 水稳性好, 污染小等优点^[5-7], 已被广泛运用到实际工程中. 目前, 国内学者已对水泥改性膨胀土做了一系列研究, 李红炉等^[8]对水泥改性膨胀土的干密度及自由膨胀率进行室内研究, 结果表明, 水泥改性膨胀土随着拌和后放置时间的增长, 压实干密度先减小后增大, 同时土体的自由膨胀率前期快速减小, 7 d 后逐渐趋于稳定. 刘志彬等^[9]对水泥改性膨胀土内微观孔隙进行了定量研究, 发现改性膨胀土中存在较多窄缝状孔隙, 同时水泥的掺入使得膨胀土内的微孔体积显著减小. 黄斌

等^[10]对南阳段膨胀土进行了水泥改性试验研究, 研究发现随水泥掺量的增加, 膨胀土胀缩特性降低, 但掺量达一定程度后, 水泥掺量的增加对胀缩特性的抑制效果并不明显. 赵春吉等^[11]对水泥改性强膨胀土进行理化试验研究, 从微观角度分析了水泥改性膨胀土的机理. 然而, 对于水泥改性膨胀土在反复干湿循环过程中的变形以及强度变化特征的研究鲜有报道. 因此, 有必要研究干湿循环条件下水泥改性膨胀土的变形和强度变化规律.

笔者以合肥地铁 1 号线太湖路车站建设工程中的膨胀土为试验对象, 进行干湿循环条件下素膨胀土和改性膨胀土的变形和强度试验, 从而得出干湿循环作用对水泥改性膨胀土变形与强度的影响以及水泥改性对抑制膨胀土干湿循环作用的效果, 为膨胀土地区水泥改性的设计与施工提供科学合理的依据.

1 试样材料及制样方法

1.1 膨胀土及水泥基本物理特性

试验用土取自合肥地铁 1 号线太湖路车站, 埋深 14 m, 颜色为淡黄色, 其基本物理性质指标见表 1.

1.2 试样制备

根据土工试验规范^[12], 将从现场取回来的土

收稿日期: 2015-12-30; 修订日期: 2016-01-19

基金项目: 中央高校基金科研业务费专项基金(2014B36614)

通信作者: 王艳巧(1983—), 女, 安徽萧县人, 河海大学讲师, 博士, 主要从事边坡加固处理方面研究, E-mail: wanygyq0726@163.com.

料进行翻晒风干,过 2 mm 筛.为了使水泥与土样拌合均匀,将试验所用的水泥过 0.5 mm 筛.按照试验设定含水率(水与烘干素土的质量比)22.5% 和不同水泥掺入比(水泥与烘干素土的质量比),称取试样所需土样和水泥量,将水泥均匀拌入到土

中,然后均匀加入蒸馏水搅拌,使水泥改性土样含水率达到控制含水率.将配好含水率的改性土样放入密闭塑料袋内,24 h 后取出土样.土样采用液压千斤顶一次压实成环刀样,试样高度 20 mm,直径 61.8 mm,试样初始干密度为 1.60 g/cm³.

表 1 土样基本物理特性
Tab.1 The basic physical properties of soil samples

液限 $w_p/\%$	塑限 $w_L/\%$	塑性指标 I_p	比重 G	自由膨胀率 $F_s/\%$	最优含水率 $w_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_{max}/(g \cdot cm^{-3})$
48.5	23	25.5	2.47	62	22	1.58

2 试验方案

2.1 最佳水泥掺量确定

将水泥改性膨胀土(水泥掺入比为 3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%)环刀样放入恒温恒湿养护室内(温度(20±3)℃,相对湿度 90% 以上)养护 28 d,再将养护后的试样放入单联直剪仪内,在竖向荷载为 200 kPa 下进行快剪试验,得出试样的抗剪强度,试验结果如图 1 所示.由图 1 可知,随着水泥掺量的增加,水泥改性膨胀土的强度不断增加,当水泥掺量小于 5% 时,随着水泥掺量的增加,水泥改性膨胀土的抗剪强度增加较快;当水泥掺量大于 5% 时,水泥改性膨胀土抗剪强度增加较为缓慢,同时当水泥掺量大于 7% 时,水泥改性土的强度增加并不明显,因此对于该试验的膨胀土,水泥改性的最佳水泥掺量约为 5%.在实际施工时,考虑到拌和工艺、造价及现场施工等因素,还需进行校核试验,以综合确定施工用的水泥掺量.

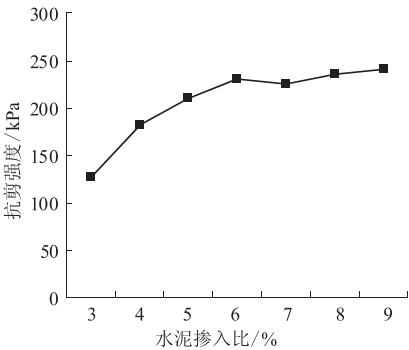


图 1 抗剪强度与水泥掺入比关系
Fig.1 The relationship between shear strength and cement content

2.2 最佳养护龄期确定

将水泥改性膨胀土(选择最佳水泥掺入比 5%)环刀样放入恒温恒湿养护室内养护 0、1、3、5、7、14、28 d,并将养护后的试样放入直剪仪内,在竖向荷载 200 kPa 下进行快剪,得出试样的抗

剪强度,试验结果如图 2 所示.由图 2 可知,水泥改性膨胀土的抗剪强度随养护龄期的增加而增加.当龄期为 5 d 时,水泥改性土的强度达到 70% 左右.试样养护至 7 d 后,抗剪强度增加缓慢,养护 14~28 d 后,抗剪强度基本保持不变.因此对于该试验的膨胀土,水泥改性的最佳养护龄期约为 28 d.

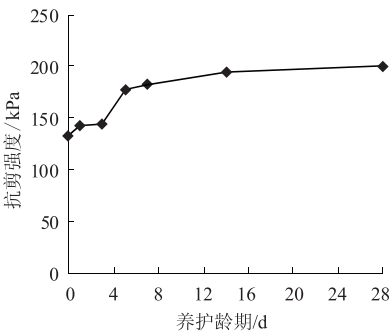


图 2 抗剪强度与养护龄期关系
Fig.2 The relationship between shear strength and curing age

2.3 干湿循环试验

根据 2.1 和 2.2 的试验结论,将水泥改性膨胀土(水泥掺入比为 5%)试样放入标准养护室内,养护 28 d,素膨胀土试样不养护.试验装置主要由千分表、环刀、透水石以及水盒等部分组成.干湿循环试验步骤如下:

- (1)失水收缩过程.将试样放在自然条件下风干,对其进行失水收缩,每隔一定时间记录一次试样高度,当含水率为 11% 时,失水收缩阶段结束,至此试样完成失水收缩过程.为了加快试样风干速率,在环刀试样的顶部采用多孔板.
- (2)吸水膨胀过程.将失水后的试样放在透水石上,用吸水球直接向水盒内注水,为使试样吸水均匀,在加水过程中,保持水面在透水石顶部以下,在透水石上加一张滤纸以防土体黏附其上,当千分表读数稳定时,认为试样已吸水饱和,至此试

样吸水膨胀过程结束. 试样完成一次干湿循环.

(3) 重复进行步骤(1)、(2), 完成若干次干湿循环, 在干湿循环过程中每隔一定时间记录试样高度变化.

(4) 将干湿循环结束后的试样放入单联直剪仪内, 同时对试样在竖向荷载为 100、200、300、400 kPa 下以相同速率进行快剪, 得出试样在各级荷载下的抗剪强度.

对土体进行 4 次干湿循环, 干湿循环过程中含水率变化范围为 11% ~ 38%, 控制含水率为 20%, 控制过程如图 3 所示.

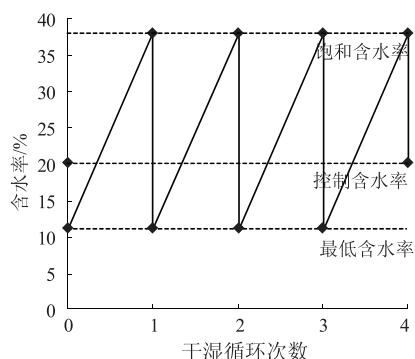


图 3 干湿循环过程示意图

Fig. 3 Sketch of wetting-drying cycle

3 试验结果分析

3.1 试样变形结果及分析

试样经过 4 次干湿循环后, 其高度变化如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 随循环次数的增加, 原膨胀土和改性后膨胀土试样经吸水饱和后高度均逐渐增大, 干缩状态时高度也逐渐增大; 且前两次高度变化幅度较大, 后两次高度变化趋于平缓, 相比较膨胀土经水泥改性后变形不明显.

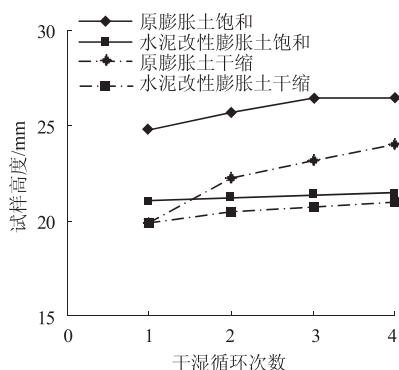


图 4 干湿循环过程中试样高度变化

Fig. 4 Variation of height of specimen under wetting-drying cycle

为分析干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形变化规律, 分别用绝对胀缩率来描述试样胀缩程度

及变化趋势. 并定义绝对膨胀率 η_{wi} 和 η_{di} 来表征整个循环过程中试样的胀缩程度及其变化, 即

$$\eta_{wi} = |(h_{wi} - h_0) / h_0| \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_{di} = |(h_{di} - h_0) / h_0| \times 100\% \quad (2)$$

式中: h_{wi} 为试样某次循环浸水饱和后的高度, mm; h_{di} 为某次试样失水干缩后的高度, mm; h_0 为制样时的高度, mm; i 为循环次数. 由测试结果及式(1)和(2)计算出水泥改性膨胀土和未改性膨胀土在干湿循环中的绝对胀缩率, 由于第一次干湿循环是从制样含水率 20% 开始循环, 因此第一次的绝对收缩率无法计算得出.

图 5 和 6 分别表示了原膨胀土与水泥改性膨胀土绝对膨胀率、绝对收缩率随干湿循环次数的增加而变化的趋势.

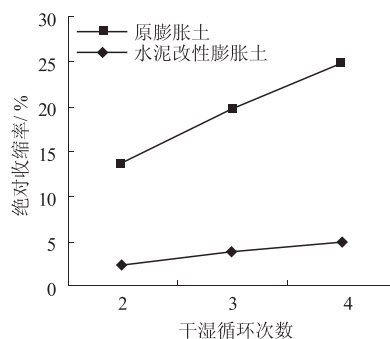


图 5 干湿循环过程中绝对收缩率变化曲线

Fig. 5 Curves of absolute shrinkage under wetting-drying cycle

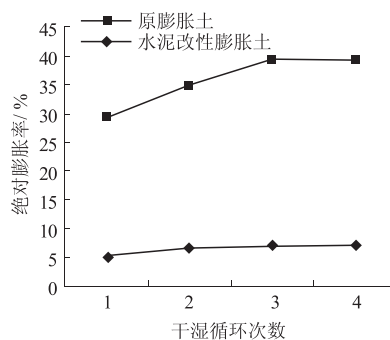


图 6 干湿循环过程中绝对膨胀率变化曲线

Fig. 6 Curves of absolute expansion under wetting-drying cycle

从图 5 和图 6 可以看出, 随循环次数增加试样的绝对胀缩率逐渐增加, 这主要是由于试样在初始状态下干燥开裂后, 其土体原有的结构遭到破坏, 导致土颗粒间的胶结变弱, 结构力逐渐消失^[13]. 随着干湿循环次数的增加, 土颗粒间的胶结进一步变弱, 吸水后试样的膨胀性逐渐体现出来, 在第 2、3 次干湿循环中这种现象表现非常明显. 因此, 在饱和状态下, 试样的高度不断增加, 同时水泥改性膨

胀土绝对胀缩率较原膨胀土明显减小,变形的幅度约为原膨胀土的 20%,说明膨胀土经水泥改性后,土体的水稳性得到了显著的提高.水泥经过水化反应产生的钙离子,在碱性环境中能与黏土矿物的二氧化硅、三氧化二铝等反应,生成不溶于水的硅酸钙水化物、铝酸钙水化物等,这些新生成的结晶化合物在水中和空气中逐渐硬化,不仅增大了土体的强度,同时也提高了水稳性^[14].

3.2 抗剪强度结果及分析

改性前后膨胀土试样经过 4 次干湿循环后,其抗剪强度分别如图 7 和图 8 所示.从图 7 可以看出,原膨胀土经干湿循环后抗剪强度明显下降,在前两次干湿循环中强度衰减的较为明显,之后强度基本趋于稳定^[15],这主要是由于在反复干湿循环过程中,裂隙会逐步发育,土体的破坏也不断累积,使土体逐渐趋于松弛,从而导致土体的干密度减小.同时干湿循环对土的粒间联结造成损伤,进一步促成了土体松散的排列结构,形成更大的孔隙空间,所以随着干湿循环次数的增加,试样的抗剪强度逐渐降低.由于膨胀土经水泥改性后,膨胀土的水稳性显著增强,土体的粒间联结能力增强,干湿循环对土的粒间联结损伤减弱.因此,水泥改性膨胀土经干湿循环后强度下降并不明显,从图 8 可以明显看出.为进一步分析改性后膨胀

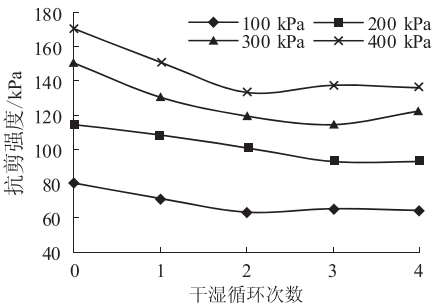


图 7 干湿循环过程中原膨胀土抗剪强度变化曲线
Fig. 7 Curves of expansive soil shear strength under wetting-drying cycle

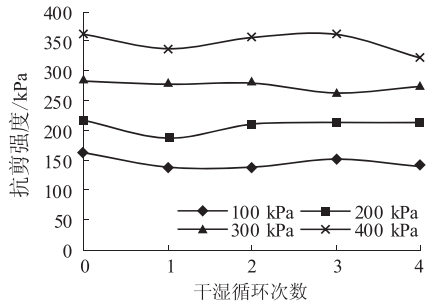


图 8 干湿循环过程中水泥改性土抗剪强度变化曲线
Fig. 8 Curves of cement-treated expansive soil shear strength under wetting-drying cycle

土强度提高原因,将改性前原膨胀土与水泥改性后膨胀土黏聚力与内摩擦角随干湿循环变化规律分别示于图 9 和图 10 中.由图可见,原膨胀土经过干湿循环后,黏聚力和内摩擦角均有明显下降.同时水泥改性膨胀土黏聚力先减小后增大,而内摩擦角先增大后减小,这主要是由于改性后膨胀土,经过 28 d 的养护后,快剪破坏为脆性破坏,剪切面并不平整.但是从总体上来看,膨胀土经水泥改性后内摩擦角以及黏聚力均明显提高.

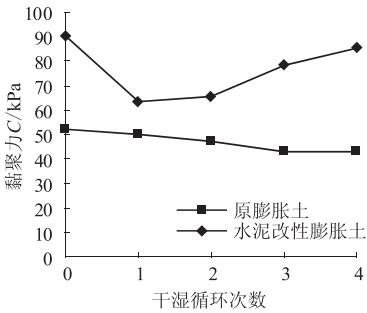


图 9 干湿循环过程中黏聚力变化曲线
Fig. 9 Curves of cohesive value under wetting-drying cycle

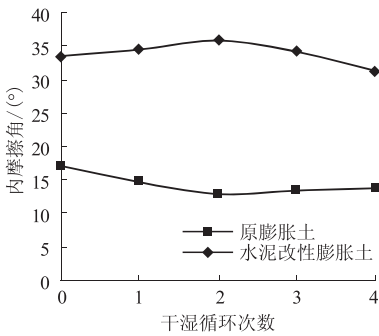


图 10 干湿循环过程中内摩擦角变化曲线
Fig. 10 Curves of internal friction angle under wetting-drying cycle

4 结论

笔者研究了干湿循环条件下水泥改性膨胀土强度及胀缩变形的变化规律,可以得到如下结论:

- (1) 水泥改性膨胀土能明显地提高膨胀土的抗剪强度,随着水泥掺量及养护龄期的增加,改性膨胀土的抗剪强度逐渐增大,并趋于稳定.
- (2) 试样干缩湿胀变形并不完全可逆. 随干湿循环次数的增多,改性前后膨胀土的绝对胀缩率均在逐渐增加,在第 1、2 次循环过程中其变形的变化幅度较大,之后基本趋于稳定. 水泥改性膨胀土较原膨胀土,绝对胀缩率明显减小.
- (3) 原膨胀土经历干湿循环作用后抗剪强度明显下降,黏聚力和内摩擦角均有明显下降,并且

在前两次干湿循环中强度衰减的较为明显. 水泥改性膨胀土较原膨胀土内摩擦角以及黏聚力均明显提高, 且经历干湿循环作用后强度并未发生明显下降.

参考文献:

- [1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984: 1-20.
- [2] 杨果林, 刘义虎, 黄向京. 膨胀土处置理论与工程建设新技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 1-7.
- [3] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936-1941.
- [4] 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.
- [5] 李东森, 夏熙临, 陈丛丛, 等. 石灰、水泥及砂改性膨胀土工程特性的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 25-27.
- [6] LORENZO G A, BERGADO D T. Fundamental parameters of cement-admixed clay-new approach[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2004, 130(10): 1042-1050.
- [7] BROMS B B. Stabilization of soft clay with lime columns[C]//Proceedings of the seminar on soil Improvement and construction techniques on soft ground. Singapore: Nanyang Technological Institute, 1984: 120-133.
- [8] 李红炉, 徐秋达. 水泥改性膨胀土干密度与自由膨胀率试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 216-219.
- [9] 刘志彬, 施斌, 王宝军. 改性膨胀土微观孔隙定量研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 526-530.
- [10] 黄斌, 聂琼, 徐言勇, 等. 膨胀土水泥改性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(11): 27-30.
- [11] 赵春吉, 赵红华, 常艳, 等. 水泥改性强膨胀土理化试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(6): 604-611.
- [12] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [13] 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.
- [14] 熊海帆. 膨胀土水泥改性试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2010.
- [15] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44-50.

Experimental Research Deformation and Shear Strength on Cement-treated Expansive Soil During Wetting-drying Cycles

WANG Jianlei¹, WANG Yianqiao², YANG Gangdong², ZHANG Yangfan², JIANG Hongyu²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to reveal the influence of wetting-drying cycles on the mechanical of cement-treated expansive soil, the expansive soil obtained from excavation of Hefei Metro Line 1 Taihu Road Station was taken as test object. The optimal cement ratio and curing period were determined, direct shear test was conducted under different cement ratio and curing period cement-treated expansive soil. Based on this, expansive soil and cement-treated expansive soil variation of deformation and strength test was conducted under wetting-drying cycles. It was shown that the swelling-shrinkage deformation of expansive soils was not completely reversible. Under wetting-drying cycles, shear strength of expansive soil decreased, the total ratio of swell-shrink increase and stabilized finally. Cement modified expansive soil can improve the shear strength of expansive soil and the swell-shrink of expansive was decline obviously. Variation of cement-treated expansive soil significantly decreased during wetting-drying cycles.

Key words: wetting-drying cycle; expansive soil; cement treatment; deformation; shear strength