

王威, 刘顺青, 杨正玉, 等. 干湿循环条件下镇江下蜀土的变形特性研究[J]. 华南地震, 2021, 41(2): 99–104. [WANG Wei, LIU Shunqing, YANG Zhengyu, et al. Study on Deformation Characteristics of Xiashu loess in Zhenjiang under Dry–wet Cycles [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(2): 99–104]

干湿循环条件下镇江下蜀土的变形特性研究

王威¹, 刘顺青², 杨正玉¹, 吴礼浩¹

(1. 江苏省地质矿产局第三地质大队, 江苏 镇江 212001; 2. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212100)

摘要: 镇江地区的下蜀土常作为路基填料, 然而在干湿循环作用下其变形特性如何还缺少系统研究。以镇江南徐大道附近的下蜀土为试样, 开展不同干湿循环次数下的固结压缩试验, 研究下蜀土的变形特性与干湿循环次数的变化规律, 并以此为基础, 分析干湿循环对下蜀土路基沉降的影响。研究表明: 随着干湿循环次数的增加, 镇江下蜀土的压缩系数逐渐增大, 经历5次干湿循环后, 下蜀土的压缩系数趋于稳定; 干湿循环对下蜀土路基沉降的影响较大, 随着干湿循环次数的增加, 下蜀土路基变形的影响区域从较深层逐渐向干湿循环影响层过渡。

关键词: 干湿循环; 下蜀土; 路基; 沉降; 压缩系数

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2021)02-0099-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.02.14

Study on Deformation Characteristics of Xiashu loess in Zhenjiang under Dry–wet Cycles

WANG Wei¹, LIU Shunqing^{2*}, YANG Zhengyu¹, WU Lihao¹

(1. The 3rd Geological Brigade of Jiangsu Geology & Mineral Resources Bureau, Zhenjiang 212001, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: Xiashu loess in Zhenjiang area is often used as subgrade filling material. However, there is no systematic study on its deformation characteristics under the action of wet–dry cycles. In this paper, Xiashu loess near Nanxu road in Zhenjiang is taken as the samples to carry out the consolidation compression test under different dry–wet cycles. The deformation characteristics of Xiashu loess are studied under different dry–wet cycles. And then the influence of dry–wet cycles on Xiashu loess subgrade settlement is analyzed. The results show that the compression coefficient of Xiashu loess increases with the increase of wet–dry cycles, and tends to be stable after five cycles. The dry–wet cycle has great influence on the settlement of Xiashu loess subgrade.

收稿日期: 2020-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579119);江苏省地质矿产勘查局科研项目(2019KY03)联合资助

作者简介: 王威(1978–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事下蜀土及地质灾害等方面的研究。

通信作者: 刘顺青(1985–), 男, 博士, 讲师, 主要从事土的基本特性及边坡稳定性方面的研究。

E-mail: sqljust@just.edu.cn

With the increase of the number of dry-wet cycles, the influence area of Xiashu loess subgrade deformation gradually transits from deeper layer to dry-wet cycle influence layer.

Keywords: Dry-wet cycle; Xiashu loess; Subgrade; Settlement; Compression coefficient

0 引言

镇江地处江苏西南部，位于宁镇山脉东段，镇江地区的地层自震旦系至第四系均有分布，其中第四系下蜀土的覆盖面积约占陆地总面积的一半^[1]。下蜀土是一种特殊的沉积性土壤，形成于中、晚更新世，在长江中下游地区分布较广，镇江地区的岗地、低山、河流阶地以及三角洲平原等均有分布。下蜀土在天然状态下多呈现褐色、黄褐色，强度和承载力较高^[2]，其所含黏土矿物通常以伊利石为主^[3-4]，具有遇水膨胀、失水收缩等特性^[5-9]，一般为弱膨胀性土^[7]。

由于填料缺乏，在镇江地区修建公路时广泛采用下蜀土作为路基填料，然而下蜀土的变形特征与一般黏性土有着较大的差别。通过人工压实达到压实度的下蜀土能够满足路基填料的要求，然而实际工程中的压实下蜀土往往会受到各种自然环境条件的影响，如降雨和蒸发、地下水位升降等干湿循环作用^[8]。一般而言，压实后的填土在经历反复的干湿循环作用后，其物理力学特性会发生显著变化^[9]。如张芳枝等^[10]研究发现干湿循环作用是压实黏土力学特性发生不可逆变化的主要原因；周勇等^[11]研究发现干湿循环作用会导致不同压实度的黏土产生不可逆的体积收缩并产生众多的微裂隙；Malusis 等^[12]研究发现垂直收缩及水力传导系数随着干湿循环次数的增加而增大。除上述之外，干湿循环作用也是导致路基产生不均匀沉降^[13-14]及边坡失稳^[15-16]等工程病害的主要原因。

从上述的分析可知，干湿循环对黏性土的变形特性具有重要影响，而对于下蜀土这种弱膨胀性土其影响更大。然而已有的研究中，仅有干湿循环对下蜀土渗透特性^[17]及强度特性的影响^[7]，而其对于下蜀土的变形特性影响如何，目前还缺少系统性研究。

本文以镇江南徐大道附近的下蜀土为试样，开展不同干湿循环次数下的固结压缩试验，研究下蜀土的变形特性与干湿循环次数的变化规律，并以此为基础，分析干湿循环对下蜀土路基沉降的影响规律。研究结果为下蜀土路基的设计施工及养护治理提供了参考依据，具有一定的实际工

程意义。

1 试验土料及测试方法

1.1 试验土料的基本特征

试验所用的下蜀土取自镇江南徐大道附近。试验所用下蜀土的粒组成分如表 1 所示，基本物理力学指标如表 2 所示。由表 1、表 2 及《膨胀土地区建筑技术规范》^[18](GB50112-2013)可知，试验所用下蜀土为弱膨胀性黏土。

表 1 下蜀土的颗粒组成
Table 1 Particle composition of Xiashu loess

粒径/mm	含量/%
1~0.5	1.9
0.5~0.25	8.6
0.25~0.075	7.9
< 0.075	81.6

表 2 下蜀土的基本性质指标
Table 2 The basic properties of Xiashu loess

比重 G_s	液限/% W_L	塑性/% W_p	自由膨 胀率/% δ_{ef}	黏土矿物含量/%		
				伊利石	蛭石	高岭石
2.7	37.4	17.5	50	68.5	24.1	7.4

1.2 测试方法

本试验控制下蜀土试样的干密度为 $1.7\pm0.02\text{ g/cm}^3$ 。下蜀土试样实施的干湿循环次数分别为 0、1、2、3、4、5、6 次，每个干湿循环次数下制备 3 个重塑土样，共制备下蜀土试样 7 组。

试样制备时在环刀的上、下方各用一张直径为 79.8 mm 的滤纸和一块直径为 79.8 mm 的透水石，防止下蜀土吸水膨胀而导致部分土粒散落。采用喷雾器对下蜀土上方的透水石连续喷水来实现加湿，每次喷湿时间至少 5 min，每天喷 4 次，如此连续喷洒 3 d 可近似认为下蜀土试样达到饱和。将饱和后的下蜀土试样称重后，放入温度为 40 ℃(模拟实际的自然环境)的烘箱中 24 h，如此

认为完成1次干湿循环。为保证每次干湿循环次数下的试样充分饱和,试样达到干湿循环次数后依然浇水三天。

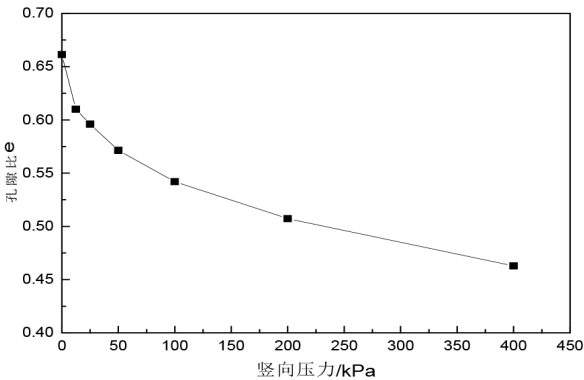
1.3 下蜀土试验的固结压缩试验

将完成预定干湿循环次数的饱和下蜀土试样装入固结容器,施加的竖向压力分别为12.5、25、50、100、200、400 kPa,待每级荷载下每小时的变形量小于0.01 mm时,可认为试样固结稳定。试验仪器采用南京宁曦土壤仪器有限公司生产的WG-4型固结仪。试样过程按照《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)^[9]进行。

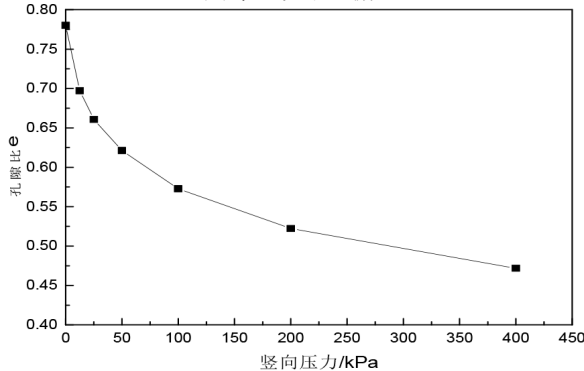
2 试验结果及分析

2.1 不同干湿循环次数下蜀土的压缩曲线

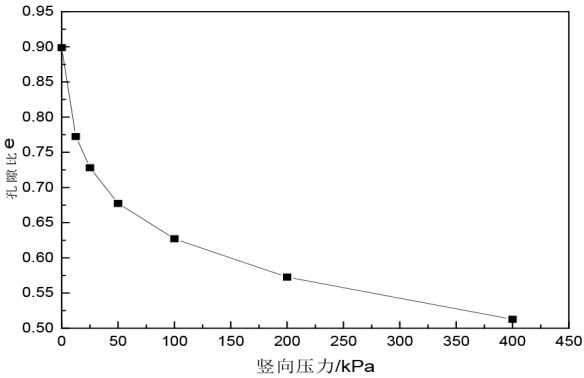
不同干湿循环次数下下蜀土的压缩曲线如图1所示。从图1中可以看出,不同的干湿循环次数下,随着竖向压力的不断增大,下蜀土孔隙比的减小速率逐渐降低;随着干湿循环次数的增加,下蜀土的压缩变形逐渐增大,但是达到一定循环次数后趋于稳定,即此时下蜀土的压缩变形达到了某一新的平衡。这种现象表明,路基中的下蜀土会随着干湿循环作用的不断增强,仍可能发生弱化现象,从而产生较大的路基变形。



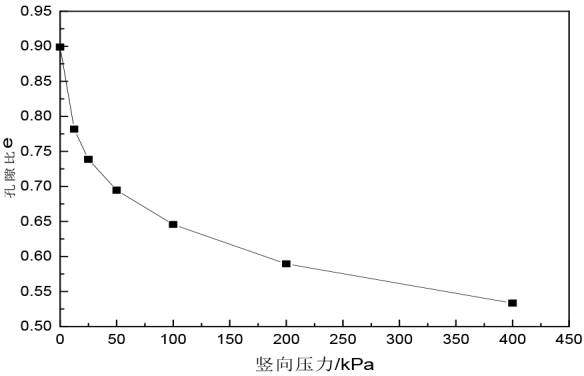
(a)第0次干湿循环



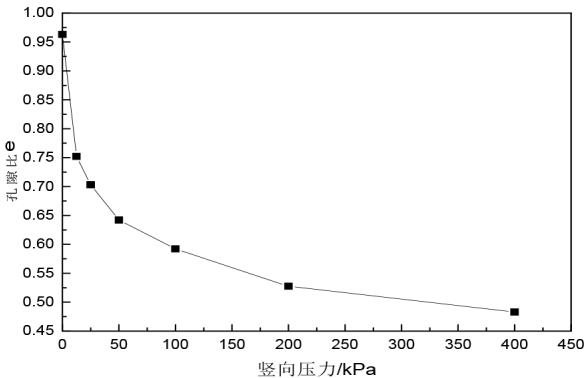
(b)第1次干湿循环



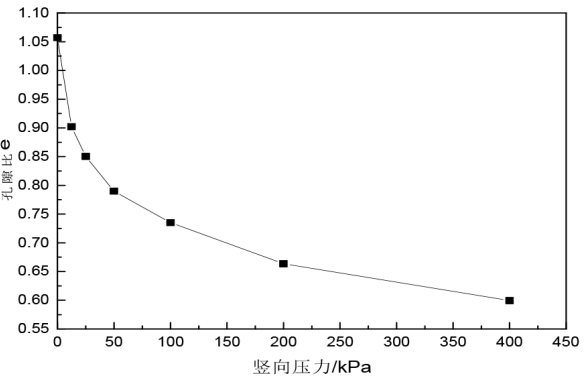
(c)第2次干湿循环



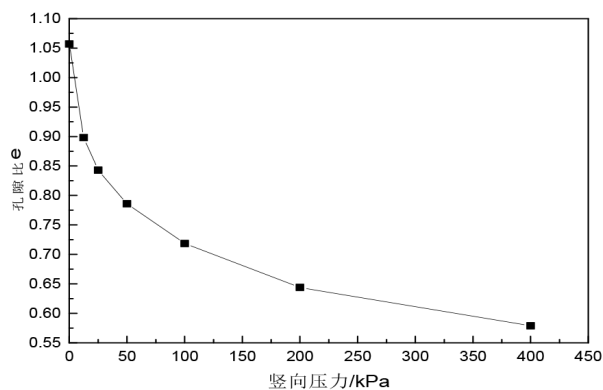
(d)第3次干湿循环



(e)第4次干湿循环



(f)第5次干湿循环



(g)第6次干湿循环

图1 不同干湿循环次数下蜀土的压缩曲线

Fig.1 Compression curve of Xiashu loess under different dry-wet cycles

2.2 干湿循环对下蜀土压缩系数的影响分析

为定量表示干湿循环次数对下蜀土压缩系数的影响,采用下蜀土在竖向压力 100~200 kPa 范围内的压缩系数,相应的压缩系数曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出,干湿循环对下蜀土的压缩系数影响较大,未经历干湿循环的饱和下蜀土试样为中压缩性土,随着干湿循环次数的增加,下蜀土逐渐由中压缩性向高压压缩性转变,经历 5 次干湿循环后,下蜀土的压缩系数趋于稳定。

造成上述结果的主要原因是干湿循环导致一定深度的下蜀土试样经历失水干缩吸水膨胀,在如此循环下试样表面出现松散,并出现裂隙,随着干湿循环次数的增加,下蜀土内部不再产生新裂隙,水对试样的影响深度趋于稳定,从而使得下蜀土压缩系数的增值变小,最后逐渐趋于稳定。

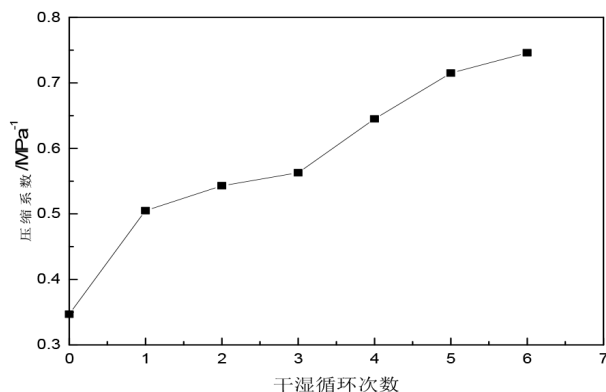


图2 不同干湿循环次数下蜀土的压缩系数曲线

Fig.2 Compression coefficients of Xiashu loess under different dry-wet cycles

2.3 干湿循环对下蜀土形态的影响分析

不同干湿循环次数下干燥及饱和状态下蜀土的形态如图 3、4 所示。图 3、4 中从左到右分别为 1~6 次干湿循环的下蜀土试样。

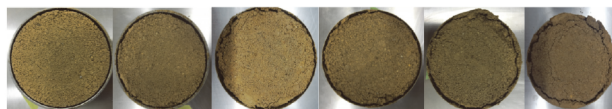


图3 干燥状态下蜀土的形态

Fig.3 Morphology of Xiashu loess in dry state

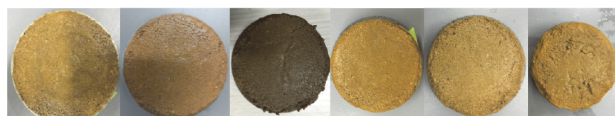


图4 饱和状态下蜀土的形态

Fig.4 Morphology of Xiashu loess in saturated state

从图 3、4 中可看出,下蜀土试样经历 1 次干湿循环就与环刀壁脱开,并且试样边缘有一定的裂纹出现,3 次干湿循环后裂纹数量逐渐增多,当达到 6 次干湿循环时,试样周边裂纹较多,并且环刀壁周边土体有一定的脱落。在下蜀土在吸水饱和过程中,脱水形成的表面裂纹又逐渐闭合,但其内部因干湿循环导致的损伤不可恢复,从而导致其力学特性的变化。

3 干湿循环对下蜀土压缩系数增加率的影响分析

为定量分析干湿循环次数对下蜀土压缩系数的影响,给出下蜀土压缩系数增加率 Δ_i 的定义:

$$\Delta_i = \frac{|a_{vi} - a_{v0}|}{a_{v0}} \times 100\% \quad (1)$$

式 (1) 中, a_{vi} , a_{v0} 分别为第 i 次与第 0 次干湿循环时下蜀土的压缩系数。

为使问题更清晰,按式(1)计算了不同干湿循环次数下蜀土压缩系数的增加率,计算结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,当干湿循环次数分别为 1、2、3、4、5、6 时,下蜀土压缩系数的增加率分别为 45.5%、56.5%、62.2%、85.9%、106.0%、115.0%,可见,干湿循环对下蜀土的压缩系数有着重要的影响。产生上述结果的原因可能是下蜀土中的盐晶体在反复的干湿循环中不断淋滤,造成其易溶盐含量等变化,从而使得土体表面的扩散层变厚,颗粒之间的联接力减弱。另一方面,下蜀土中伊利石等亲水矿物在吸水过程中不断膨

胀,从而导致土体骨架膨胀;干燥过程中下蜀土骨架收缩,导致土中的部分微小裂纹扩张,使得土中孔隙含量增加,且体积不能恢复到吸水之前的状态,宏观上表现为下蜀土的体积增大,在相同竖向荷载下,相应的压缩系数就相应的增大,但这种影响在 5 次干湿循环以后逐渐趋于平缓。

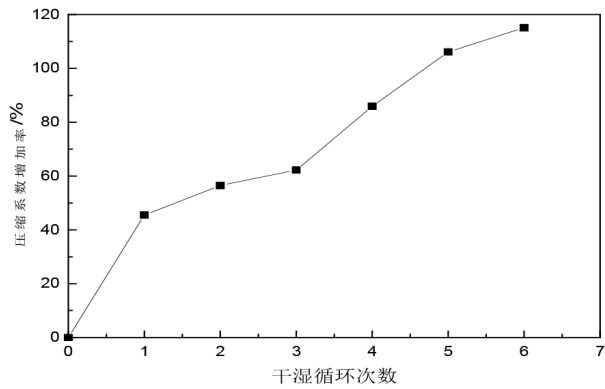


图 5 不同干湿循环次数下蜀土压缩系数的增加率
Fig.5 Increase rate of compression coefficient of Xiashu loess under different dry-wet cycles

4 干湿循环对下蜀土路基沉降的影响分析

本文采用 GEO5 中的有限元模块建立下蜀土路基的数值模型,根据前人的研究结果,将作用于路基上面的车辆荷载等效为均布荷载,大小取为 20 kPa^[20],计算模型如图 6 所示。

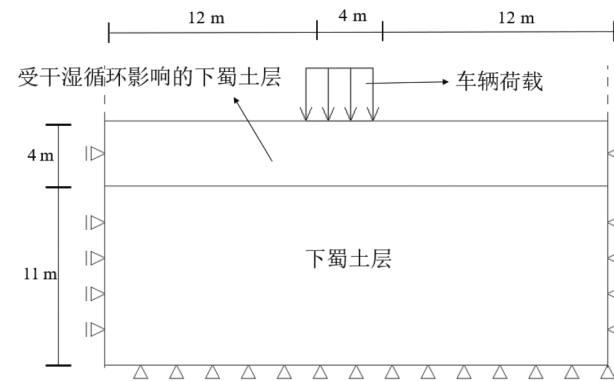


图 6 下蜀土路基沉降计算模型图
Fig.6 Settlement calculation model of Xiashu loess subgrade

下蜀土路基沉降计算时“受干湿循环影响的下蜀土”及“下蜀土”的本构模型均采用摩尔—库伦模型,相应的计算参数如表 3 所示。干湿循环影响的下蜀土弹性模型不同为引起路基沉降不同的最主要因素,因此下蜀土沉降计算时重点考

虑弹性模量的不同对路基沉降的影响,不考虑泊松比、黏聚力及内摩擦角的影响。表 3 中受干湿循环影响的下蜀土弹性模量值为第 1 次干湿循环下的值,其他干湿循环次数下的弹性模量值取本文试验研究的结果。

表 3 下蜀土路基的计算参数
Table 3 Calculation parameters of Xiashu loess subgrade

组成	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	E/MPa	ν	c/kPa	$\varphi/(\circ)$
干湿循环影响的下蜀土	19.7	12	0.3	10	15
下蜀土	19.5	20	0.3	20	30

不同干湿循环次数下蜀土路基的沉降计算结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,干湿循环对下蜀土路基的沉降影响较大,当干湿循环次数从 0~6 次时,下蜀土路基的沉降从 5.5 mm 增大到 20.7 mm。因此,实际工程中对下蜀土路基可采用一定的覆盖措施,减小干湿循环对其沉降的影响。

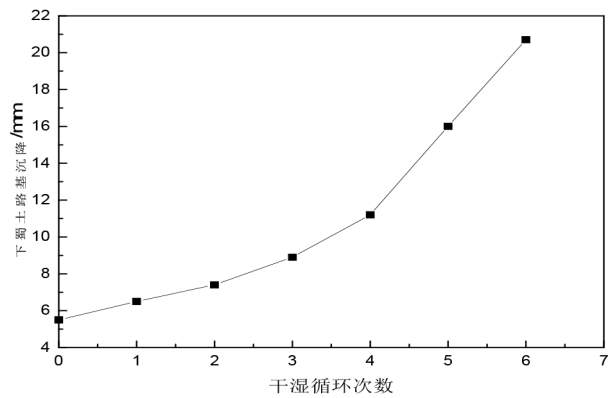


图 7 不同干湿循环次数下蜀土路基沉降
Fig.7 Settlement of Xiashu loess subgrade under different dry-wet cycles

不同干湿循环次数下蜀土路基的变形如图 8 所示,限于文章篇幅,分别选取干湿循环 0、3、6 次下的路基变形图。从图中可以看出,随着干湿循环次数的增加,下蜀土路基的变形逐渐增大,路基变形的影响区域从较深层逐渐向干湿循环影响层过渡。

5 结论

(1)在下蜀土失水干燥及吸水饱和过程中,下蜀土表面裂纹张开而后逐渐闭合,但致其内部结构损伤不可恢复,进而导致其力学特性的变化。

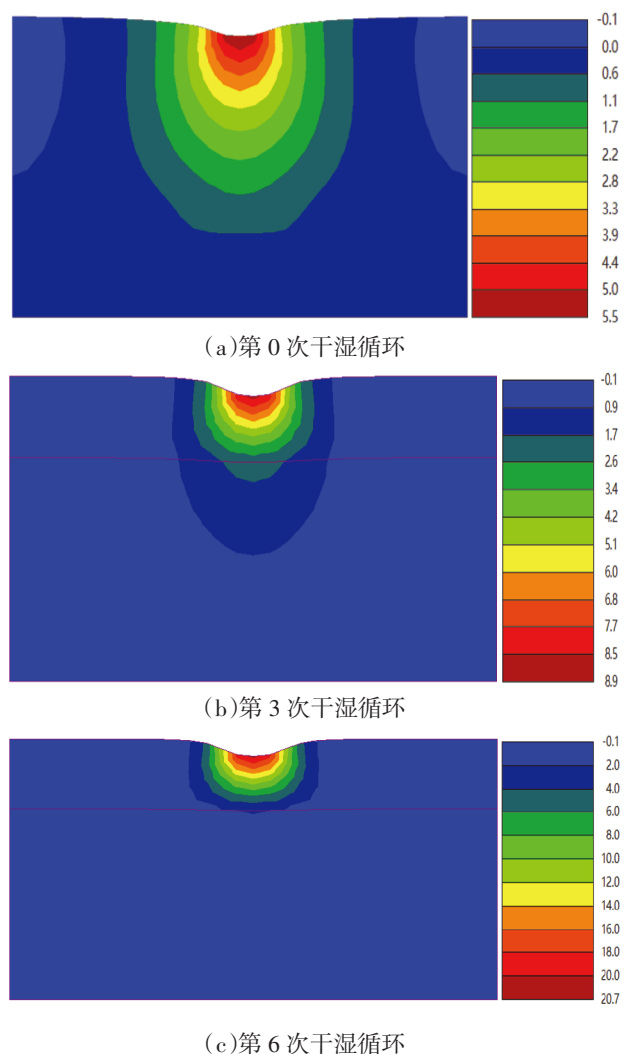


图 8 不同干湿循环次数下蜀土路基变形图

Fig.8 Deformation diagram of Xiashu loess subgrade under different dry-wet cycles

(2)随着干湿循环次数的增加,镇江下蜀土的压缩系数逐渐增大,经历 5 次干湿循环后,下蜀土的压缩系数趋于稳定。

(3)干湿循环对下蜀土路基沉降的影响较大,当干湿循环次数从 0 增加到 6 次时,下蜀土路基的沉降从 5.5 mm 增大到 20.7 mm。

(4)随着干湿循环次数的增加,下蜀土路基的变形逐渐增大,路基变形的影响区域从较深层逐渐向干湿循环影响层过渡。

参考文献:

- [1] 刘东生, 安芷生. 黄土·第四纪地质·全球变化(第三集)[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [2] 刘选, 韩德亮, 崔高嵩, 等. 黄海盆地西部下蜀黄土成因机制的新探索[J]. 海洋科学, 2000, 24(5): 52-54.
- [3] 苗永红, 张立新. 镇江地区下蜀黄土承载力探讨[J]. 工程勘察, 2007 (12): 16-19.

- [4] 韩爱民, 肖军华, 乔春元, 等. 三轴压缩下南京下蜀土的宏、微观性状试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1897-1903.
- [5] 韩爱民, 李彤, 徐洪钟. 脱湿状态下南京下蜀土的土水-力学特性[J]. 工程地质学报, 2016, 24(2): 268-275.
- [6] 韩爱民, 李彤, 章磊, 等. 南京下蜀土水敏性特征的试验研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2015, 37(6): 81-86.
- [7] 刘顺青, 胡海涛, 蔡国军, 等. 干湿循环对有无上覆荷载作用镇江下蜀土抗剪强度的影响[J]. 工业建筑, 2019, 49(4): 114-120.
- [8] 李克钢, 郑东普, 黄维辉. 干湿循环作用下砂岩力学特性及其本构模型的神经网络模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 168-173.
- [9] 王飞, 李国玉, 穆彦虎, 等. 干湿循环条件下压实黄土变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2306-2312.
- [10] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41-46.
- [11] 万勇, 薛强, 赵立业, 等. 干湿循环对填埋场压实黏土盖层渗透系数影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 679-688.
- [12] Malusis M A, Yeom S, Evans J C. Hydraulic conductivity of model soil - bentonite backfills subjected to wet-dry cycling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(8): 1198-1211.
- [13] 马历权. 公路填方路堤纵向开裂机理的理论分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 855-858.
- [14] LI G Y, MA W, WANG F, et al. Processes and mechanisms of multi-collapse of loess roads in seasonally frozen ground regions: A review[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2015, 7(4): 456-468.
- [15] 崔激, 张志耕, 闫澍旺. 膨胀土的干湿循环性状及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(5): 24-27.
- [16] 梁和成, 单慧媚. 天然饱水-失水对三峡库岸边坡土体的影响研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1837-1842.
- [17] Lu H J, Li J X, Wang W W, et al. Cracking and water seepage of xiashu loess used as landfill cover under wetting-drying cycles[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(11): 7441-7450.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50112-2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [20] 王加灿, 王志杰, 韩建刚. 车辆荷载的数值等效在基坑设计中的研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(4): 87-93.