

干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究

周 健^{1, 2}, 徐洪钟^{1*}, 胡文杰¹

(1. 南京工业大学交通学院, 江苏 南京 210009; 2. 常州市中元建设工程勘察院有限公司, 江苏 常州 213001)

摘 要: 干湿循环中土体强度变化在膨胀土边坡的稳定性分析中十分重要。通过膨胀土边坡干湿循环模型试验, 直接在坡面切取各次干湿循环后的边坡土样进行直剪试验, 得到其抗剪强度随边坡干湿循环进行而变化的规律。在此基础上, 采用有限元强度折减法评价干湿循环状态下边坡的稳定性问题。研究表明: 干湿循环作用导致边坡强度不断降低, 其中黏聚力的下降较为明显, 内摩擦角的变化较小。随着干湿循环次数的增加, 边坡稳定性降低, 安全系数减小。

关键词: 膨胀土边坡; 干湿循环; 强度折减; 稳定性

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0152-05

作者简介: 周 健 (1988-), 男, 江苏常州人, 硕士, 主要研究方向为边坡与基坑工程。E-mail: hzhxu@163.com。

Impact of wetting-drying cycle effects on stability of expansive soil slopes

ZHOU Jian^{1, 2}, XU Hong-zhong¹, HU Wen-jie¹

(1. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Changzhou Zhongyuan Engineering Prospecting Institute Co., Ltd., Changzhou 213001, China)

Abstract: The strength change of expansive soil under wetting-drying cycles plays an important role in the slope stability analysis. Through wetting-drying cycle model tests on the expansive soil slope, direct shear tests on soil samples fetched from the slope surface after various wetting-drying cycles are performed, and it follows that the strength varies with the wetting-drying cycles. The stability of expansive soil slopes under wetting-drying cycles is simulated by means of the shear strength reduction technique in finite element analysis. The results show that the shear strength of expansive soils decreases with the increasing number of cycles, the cohesion of expansive soil decreases obviously and the friction angle keeps a stable value. Furthermore, the slope stability and safe factor decrease with the increasing number of cycles.

Key words: expansive soil slope; wetting-drying cycle; shear strength reduction; stability

0 引 言

膨胀土的干湿循环特性所导致的破坏具有往复性、多发性和长久性的特点, 在实际工程中破坏巨大^[1-3]。而这些破坏都与膨胀土边坡在干湿循环后强度的衰减有关, 因此研究膨胀土稳定性问题首先要了解膨胀土强度随干湿循环进行而变化的规律。

目前, 对膨胀土干湿循环后强度的研究都是先制备扰动样或切取原状样后, 再对试样进行干湿循环。例如, 杨和平等^[4]和吕海波等^[5]分别对宁明膨胀土、阳安膨胀土和南宁地区膨胀土进行了干湿循环下的直剪试验研究, 他们认为随着干湿循环次数的增加, 黏聚力大幅减小, 之后趋于稳定, 而内摩擦角变化不大。这些研究中的干湿循环过程是将试样置于环刀中进行, 这显然抑制了膨胀土吸湿膨胀的特性, 影响循环过程中裂隙的发展。为避免这种影响, 刘华强等^[6]在对镇江膨胀土进行直剪试验时进行了改进, 先制备无约束下的试样进行干湿循环, 然后用环刀切取做直剪试验。徐彬等^[7]认为直剪试验不能很好地反映裂隙对

强度的影响, 因此首次采用了三轴试验, 从而能够更好地反映裂隙的影响。但是, 尽管如此, 这些方法都无法避免试样尺寸效应的影响, 试样由于尺寸效应, 影响了膨胀土的湿胀干缩特性, 改变了干湿循环过程中裂隙的发展规律, 所得到的强度指标也无法很好地反映实际情况。而现场取样, 也都是对取得的原状试样进行干湿循环, 要实现自然环境下的“干湿循环”并达到试验目的, 难度较大。

因此本文开展膨胀土边坡干湿循环模型试验, 然后直接取样进行剪切试验, 这种条件下模拟降雨蒸发所导致的干湿循环过程与实际情况更加接近。坡面切取各次干湿循环后的边坡土样进行直剪试验, 得到其强度随边坡干湿循环进行而变化的规律。采用有限元分析中的强度折减法来模拟边坡干湿循环过程中强度逐渐减小的过程, 通过安全系数直接评价干湿循环状

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41072217)

收稿日期: 2013-06-06

***通讯作者**

态下边坡的稳定性问题。

1 边坡模型试验方案

试验用土为南京地区的膨胀黏土，取自南京浦口区。土样呈灰绿色，黏土矿物以伊蒙混层矿物为主，其次有少量的伊利石，绿泥石和高岭石。试验前对所采用的膨胀土的物理性质进行了测定，见表 1。

表 1 膨胀土的物理性质

Table 1 Physical property of expansive soil							
自由膨胀率/%	比重	黏土矿物成分含量/%			塑限 w_p /%	液限 w_L /%	塑性指数 I_p
		伊蒙混层矿物	伊利石	绿泥石和高岭石			
75	2.7	87.4	4.3	8.3	22.9	55.5	32.6

将膨胀土烘干粉碎后，采用分层击实法在模型箱内形成图 1 所示边坡，尺寸为 80 cm×45 cm×60 cm，坡比 1：1，按初始含水率 20%配制，堆砌过程中控制干密度 1.51。

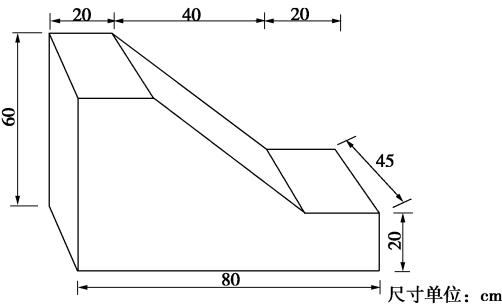


图 1 边坡模型

Fig. 1 Slope model

模型边坡共进行 4 次干湿循环，湿胀过程采用喷壶对边坡均匀降水，使坡面裂隙闭合且边坡浅层土体完全饱和时，认为湿化过程结束；干缩即为蒸发阶段，

当 24 h 内边坡不再发生干缩变形时认为干缩过程结束，该过程即为一次干湿循环。每一次循环结束后，用环刀直接切取土样进行直剪试验。对于膨胀土，干湿循环作用主要影响的是边坡的浅层区域，因此试验切取的土样为边坡表面以下 5 cm 之内的浅层土。

2 试验结果及分析

模型用分层击实法堆砌过程中，分层取样进行试验，得到平均直剪强度指标，在进行初次湿化后即为边坡的初始状态（ $N=0$ ）。表 2 为干湿循环过程中，膨胀土边坡的性状改变规律及其相对应的浅层土体强度指标。

在膨胀土边坡稳定性分析中，外界环境对土体强度的影响深度是有限的，并且受边坡表层裂隙的影响^[8]。笔者在循环实验结束后，对边坡较深土层取样，发现强度指标几乎不发生改变。因此，循环过程中，只对边坡浅层土体进行取样，例如在循环次数 $N=0$ 时对浅层土体进行环刀取样，得到黏聚力为 37 kPa，内摩擦角 φ 为 10.1°。第 1 次干循环后，坡面裂隙发育呈不规则纵横交错状，最宽处达 4 mm，深约 2 cm，湿化后第 1 次循环结束，对浅层土体取样得到直剪强度指标， c 值为 25 kPa， φ 值为 9°，下降明显。

第 3 次循环结束后边坡有明显隆起现象，局部出现塌陷；第 4 次循环中坡面产生轻微泥流和局部塌陷现象，边坡浅层土体有向下坍塌趋势，部分土体滚落，呈轻度滑移现象。这是因为边坡经过多次循环，土体结构完整性受到破坏，随着干湿循环次数的增加，边坡稳定性逐渐下降。

表 2 干湿循环下边坡的性状（稳定性）变化

Table 2 Slope behaviors under wetting-drying cycles

循环次数	试验进程	性状描述	强度指标（浅层土体）
N=0	初始状态	坡面迅速膨胀，表层细微裂隙闭合。	$c=37\text{ kPa}$ ， $\varphi=10.1^\circ$
	干缩	坡面裂隙开始发育，呈不规则纵横交错状态，最宽处达 3~4 mm，深约 2 cm。	
N=1	湿胀	裂隙逐渐闭合，土体向上膨胀明显。	$c=25\text{ kPa}$ ， $\varphi=9^\circ$
	干缩	裂隙扩展，最宽裂隙约有 5 mm。	
N=2	湿胀	裂隙逐渐闭合，土体继续膨胀，坡面中部略微隆起。	$c=22.1\text{ kPa}$ ， $\varphi=9^\circ$
	干缩	边坡表面土体部分剥落。边坡临空面中部裂隙密集，最宽约有 7 mm，深约 4~5 cm。	
N=3	湿胀	裂隙缓慢闭合，边坡中部隆起较明显。降雨时坡面产生细小泥流，局部有塌陷。	$c=17.5\text{ kPa}$ ， $\varphi=8.7^\circ$
	干缩	裂隙最宽处已接近 1 cm，坡面土块轻易脱落，局部土体塌陷。裂隙闭合缓慢，边坡中部隆起明显，呈向下坍塌趋势。降雨时坡面产生泥流，局部塌陷，土体滚落，呈轻度滑移现象。	
N=4	湿胀		$c=12.4\text{ kPa}$ ， $\varphi=8.4^\circ$

通过对边坡浅层土取样试验,将不同次数干湿循环情况下所得的膨胀土黏聚力和内摩擦角与干湿循环次数的关系综合绘于图 2,从而研究膨胀土边坡土体强度随干湿循环变化的基本规律。结果表明,干湿循环导致边坡强度不断减小,其中黏聚力的下降较为明显,4 次干湿循环后减小了 24.6 kPa,内摩擦角的下降幅度不大。第 1 次干湿循环后,黏聚力和内摩擦角的减小幅度最大,黏聚力从初始状态的 37 kPa 衰减至 25 kPa,之后下降趋势都相对变缓,尤其是内摩擦角改变很小。这个结论与直接在对试样进行干湿循环的实验结果类似,例如韩华强等^[9]通过常规土工试验,得出了干湿循环将导致膨胀土长期强度和变形模量明显降低的结论,并且干湿循环对非饱和膨胀土强度指标中凝聚力的影响明显大于内摩擦角。崔激等^[8]则指出干湿环境变化影响膨胀土的强度,并且第 1 次干湿循环对于膨胀土强度的衰减起主要作用。在干湿循环条件下,膨胀土强度的衰减是有一个基本界限的,在经过 4~5 次干湿循环之后,其强度和变形属性的变化基本趋于稳定^[8],本试验在 4 次循环后黏聚力和内摩擦角分别衰减至 12.4 kPa 和 8.4°。

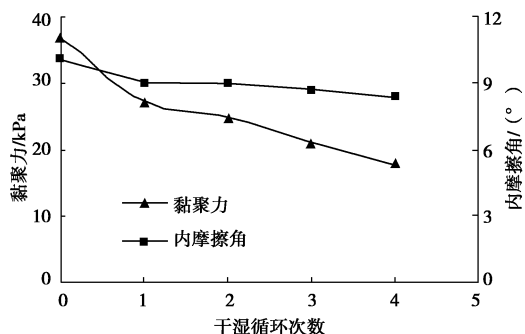


图 2 强度指标随干湿循环次数变化关系

Fig. 2 Relationship between strength index and number of wetting-drying cycles

3 干湿循环条件下膨胀土边坡的稳定性分析

3.1 强度折减法

针对边坡的稳定性分析,主要有极限平衡和有限元分析两种方法。极限平衡法通过安全系数来评价边坡稳定性已被广泛应用,有限元分析法则无法直接评价边坡稳定,一般根据边坡位移场,塑性区等来间接评价,而强度折减法^[10]直接通过有限元分析获得一个安全系数,不仅保持了有限元在模拟复杂问题上的优点,而且概念明确,结果直观。根据试验所得强度参数,在 ABAQUS 中实现边坡强度折减,研究边坡模型的稳定性。将折减系数以场变量的形式赋予 ABAQUS,动态显示塑性区发生发展的过程。当塑性

区贯通且位移和应变发生突变时,边坡处于破坏的临界状态,将此时的折减系数作为边坡的最小稳定系数^[11]。

3.2 数值模型

运用有限元软件 ABAQUS 对膨胀土边坡模型试验工况进行数值模拟,并计算边坡的稳定性。

土体强度服从莫尔-库仑强度准则。通过膨胀土边坡干湿循环模型试验,直接在坡面切取各次干湿循环后的边坡土样进行试验获得土体强度参数,强度参数见表 2。在膨胀土边坡稳定性分析中,外界环境对土体强度的影响深度有限,因此计算时对模型进行分区,认为强度变化只发生在浅层土体,根据模型试验结果,确定厚度为 10 cm,如图 3 所示,红色区域为强度的影响区域。

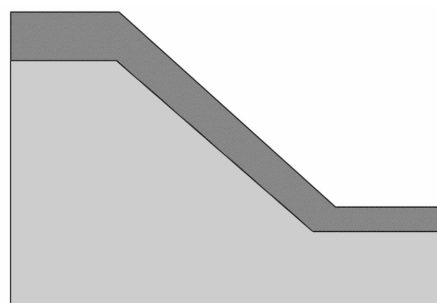


图 3 计算模型

Fig. 3 Computational model

3.3 结果分析

如图 4 所示为不同干湿循环次数条件下边坡塑性区(积分点上的等效塑性应变)的分布。分析结果显示,边坡初始塑性应变很小,且最先出现在坡脚位置处,随后屈服点向上延伸扩展。

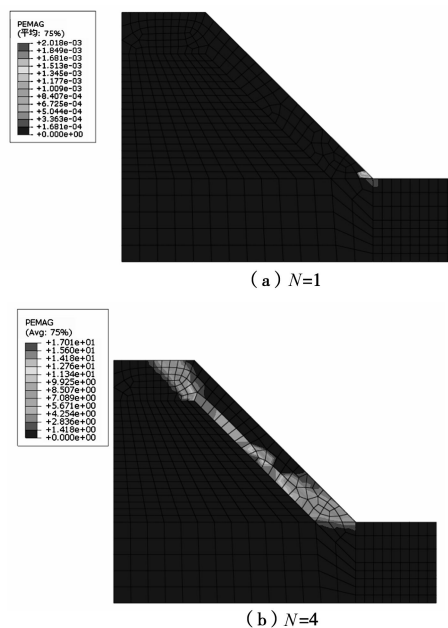


图 4 膨胀土边坡塑性区

Fig. 4 Plastic zone of expansive slope

数值结果显示,塑性区的等效塑性应变是随着干

湿循环次数的增加而增加, 当最后一次循环结束后, 边坡逐渐形成一个可能的剪切破坏带。可见干湿循环对土体稳定的破坏作用随着循环次数的增加而增加。

图 5 为 $N=4$ 时的水平位移分布图。塑性区和水平位移分布图都说明膨胀土边坡发生浅层滑动。而模型试验过程显示, 膨胀土模型边坡土体隆起明显, 呈向下坍塌趋势。降雨时坡面产生泥流, 局部塌陷并有土体滚落。

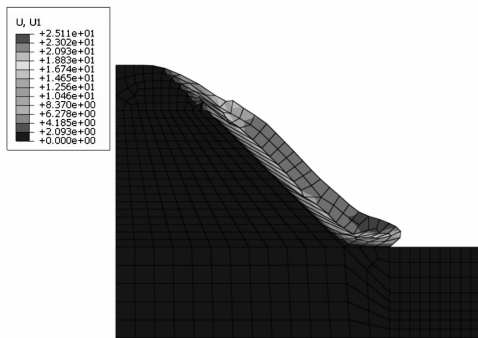


图 5 $N=4$ 时的边坡水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of slope when $N=4$

边坡塑性区、位移场的变化规律实际上已经反应了边坡的稳定性情况。分析边坡初始状态下 ($N=0$) 的数值结果, 以坡面节点的位移发生突变作为失稳判据, 并取节点水平位移随场变量变化关系曲线拐点处对应的场变量值作为安全系数, 则安全系数为 1.38。以此为标准得出第 1 次到第 4 次干湿循环后, 边坡安全系数分别为 1.29, 1.24, 1.02, 0.91, 如图 6 所示。可以看到, 边坡安全系数随着干湿循环次数的增加而降低, 4 次干湿循环后边坡失稳, 此时对应的安全系数小于 1。

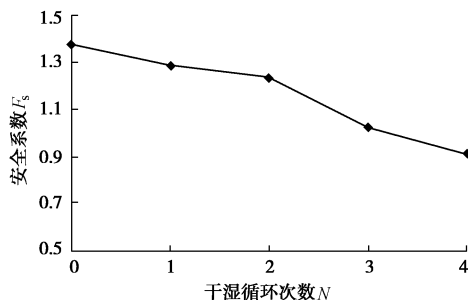


图 6 F_s 随干湿循环次数的变化关系

Fig. 6 Variation of F_s with number of wetting-drying cycles

4 结 论

本文开展膨胀土边坡干湿循环模型试验, 然后直接取样进行剪切试验, 根据试验所得的边坡强度指标, 采用有限元强度折减法进行边坡稳定性分析。得出以下结论:

(1) 干湿循环作用导致边坡强度不断降低, 其中黏聚力的下降较为明显, 内摩擦角变化不大。

(2) 干湿循环对边坡强度的影响主要在浅层土体, 其加剧了边坡裂隙发展, 破坏土体整体性结构, 影响边坡稳定性。

(3) 随着干湿循环次数的增加, 边坡稳定性降低, 安全系数减小。考虑干湿循环效应的膨胀土边坡稳定性分析方法符合实际情况。

(4) 采取合适的排水、隔水措施, 防止膨胀土边坡由于干湿循环导致的破坏。

参考文献:

- [1] 刘 鸣, 刘 军, 谭峰屹, 等. 新乡膨胀岩试验段渠坡处理现场监测研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(10): 148 - 155. (LIU Ming, LIU Jun, TAN Feng-yi, et al. In-situ monitoring of canal slope treatment at the expansive rock test section in Xinxiang[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(10): 148 - 155. (in Chinese))
- [2] Technical Committee on Expansive Soils. Test procedures for identification and classification of swelling soils and evaluation of swelling pressure and heave[C]// Proceedings of 6th International Conference on Expansive Soils. New Delhi, India, 1987. 770-785.
- [3] JI Zhu-sun, WEN Hui-xiao. Effects analysis of expansive soil slope reinforced with geogrid considering long term weathering[J]. Advanced Materials Research, 2011: 261 - 263.
- [4] 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(自然科学版), 2005, 2(2): 1 - 5. (YANG He-ping, XIAO Duo. Effects of expansive soil under influence of drying and wetting cycles[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2005, 2(2): 1 - 5. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] 徐 彬, 殷宗泽, 刘述丽. 裂隙对膨胀土强度影响的试验

- 研究[J]. 水利水电技术, 2010, **41**(9): 100 - 104. (XU Bin, YIN Zong-ze, LIU Shu-li. Experimental study on strength of expansive soil under influence of cracks[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, **41**(9): 100 - 104. (in Chinese))
- [8] 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]. 水利建筑与工程学报, 2010, **8**(5): 24 - 27. (CUI Wei, ZHANG Zhi-geng, YAN Shu-wang. Cyclic behavior of expansive soils and its application in slope stability analysis[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, **8** (5): 24 - 27. (in Chinese))
- [9] 韩华强, 陈生水. 膨胀土的强度和变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(3): 422 - 424. (HAN Hua-qiang, CHENG Sheng-shui. A study on strength and deformation of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26** (3): 422 - 424. (in Chinese))
- [10] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and nonassociated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975, **25**(4): 691 - 689.
- [11] 周先齐, 徐卫亚, 钮新强, 等. 基于强度折减的离散单元法在岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 长江科学院院报, 2008, **25**(5): 107 - 110. (ZHOU Xian-qi, XU Wei-ya, NIU Xin-qiang, et al. Application of DDA based on strength reduction in rock slope stable analysis[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, **25**(5): 107 - 110. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)