

DOI: 10.11779/CJGE2017S1026

脱湿速率对膨胀土堑坡稳定性的影响分析

徐 锷¹, 耿之周^{*1}, 李雄威²

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 2. 常州工学院, 江苏常州 213002)

摘要: 以广西南宁膨胀土为研究对象, 设置不同温湿度条件引起的脱湿环境, 测试不同脱湿速率作用下, 膨胀土的收缩特性以及持水能力, 预测不同脱湿速率作用下非饱和土体渗透曲线, 并对膨胀土边坡雨水入渗过程进行数值模拟计算。试验结果表明, 脱湿速率越小, 膨胀土收缩变形越大, 这说明自然条件下湿度大的气候里, 经过缓慢蒸发, 表层土体的膨胀潜势会较大。数值计算结果表明, 脱湿速率较小时, 降雨后边坡雨水入渗的影响深度较大, 这说明, 湿度大的气候条件下, 长期的蒸发过程, 会导致更大的降雨入渗深度, 从而不利于膨胀土边坡的稳定。

关键词: 膨胀土; 墓坡; 脱湿; 土水特征曲线; 非饱和渗透系数曲线

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0131-04

作者简介: 徐 锷(1982-), 男, 博士, 主要从事软土地基处理、淤泥固化以及环境土工等方面的研究。E-mail: kxu@nhri.cn。

Influence of different drying rates on stability of cut slope of expansive soils

XU Kai¹, GENG Zhi-zhou¹, LI Xiong-wei²

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: For the expansive soils of Nanning in Guangxi province of China different drying environments are acquired to test the shrinking characteristics and water retention by setting different temperature and humidity conditions. The unsaturated permeability curves under different drying rate are predicted. The infiltrating process of cut slope is numerically simulated. The test results show that the slow drying rate produce a large shrinking deformation. The sustainable evaporation with high humidity results in a large potential swelling deformation in shallow strata. The numerical computation indicates that an evaporation process of slow drying rate produces a large infiltration depth. It is concluded that the sustainable evaporation with high humidity induces a large infiltration depth, which is adverse to the stability of cut slope of expansive soils.

Key words: expansive soil; cut slope; drying; SWCC; unsaturated permeability curve

0 引言

膨胀土的胀缩性是膨胀土最明显的特征, 膨胀土的胀缩变形与土体吸湿速率^[1]和脱湿速率^[2]等有直接关系, 这说明不同的水分迁移路径将会引起膨胀土不同的变形行为。土水特征曲线(SWCC)是表示非饱和土基质吸力与含水率之间关系的曲线, 它反映基质吸力作用下土的持水性能^[3-4], 文献[2]通过室内试验研究表明, 膨胀土含水率的变化过程将影响膨胀土的胀缩状态, 而不同的水分迁移路径也会影响膨胀土的持水能力。

自然环境中, 膨胀土常处于较坚硬的状态, 但是它对气候变化特别敏感, 特别是久旱降雨及多雨炎热的气候条件, 这种敏感性会对膨胀土边坡造成严重的危害, 而且这种破坏具有长期性、反复性和潜在性^[5-6]。事实上, 对于膨胀土边坡, 蒸发效应导致土体裂隙的

开展是边坡发生灾变的一个重要前提^[7]。然而, 不同气候环境与季节条件下, 会形成不同的蒸发脱湿环境, 从而形成降雨之前, 膨胀土堑坡不同的初始状态。

本文在文献[2]对不同脱湿速率作用下膨胀土胀缩特性和持水能力的研究基础上, 对堑坡稳定性展开研究分析, 目的是获得不同蒸发脱湿路径对降雨后膨胀土堑坡稳定性的影响机理。

1 试验材料及方法

1.1 试验土样

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201401006); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501043); 国家自然科学基金项目(51408381)

收稿日期: 2016-11-28

*通讯作者(E-mail: zzgeng@nhri.cn)

试验土样取自广西南宁市郊外，对原场地进行现场开挖，浅层有灰白色膨胀土分布，土样胀缩特性见表 1，根据膨胀潜势等级判定标准，灰白色黏土为强膨胀土。

表 1 膨胀土胀缩特性

Table 1 Swelling-shrinkage characteristics of expansive soils

土样	自由膨胀率/%	收缩系数	缩限/%	体缩率/%	50 kPa 膨胀率/%
灰白色膨胀土	98	0.44	19.5	20.4	-0.085

1.2 试验方案

试验中制样设备为恒温恒湿箱，根据常见自然条件和仪器设备的特性设定了脱湿环境^[2]，具体参数如表 2，试样制备方案见表 3。

选取天然密度与含水率相近土样 4 组，每组 2 个平行试样，经过抽气饱和后，依据《土工试验规程》(SL237—1999)，采用收缩仪在恒温恒湿箱中按预先设置 4 种不同脱湿环境中进行收缩试验。

表 2 试样制备环境参数^[2]

Table 2 Environmental parameters of sample preparation^[2]

脱湿速率方案	脱湿环境参数	
	温度/℃	湿度/%
方案1	25	30
方案2	25	60
方案3	25	75
方案4	25	90

表 3 试样制备方案

Table 3 Preparation programs of samples

编号	土样脱湿试验方案	土样目标含水率/%			
		35	30	25	20
1	方案 1	3	3	3	3
2	方案 2	3	3	3	3
3	方案 3	3	3	3	3
4	方案 4	3	3	3	0

2 不同脱湿速率下膨胀土的物理特性

2.1 收缩特性

不同温湿度环境下的膨胀土线缩率与含水率变化关系如图 1 所示。在线性脱湿过程阶段，采用重力含水率与时间线性回归方程的斜率绝对值表述土体的脱湿速率，4 种脱湿环境对应的土样脱湿速率如表 4 所示。从线缩率与含水率变化关系不难发现，当膨胀土的含水率小于其缩限时，土体体积依然会发生一定的收缩变形，但在不同的脱湿环境条件下，试样的收缩性状呈现较大不同，说明脱湿速率对膨胀土的收缩特性影响较大。

由以上分析可以看出，土体的收缩特性与土体的

脱湿速率关系密切，不同的脱湿速率产生了不同的脱湿路径，而缓慢的脱湿过程将造成土体更大的收缩变形，这说明缓慢的失水路径更利于土体的收缩。

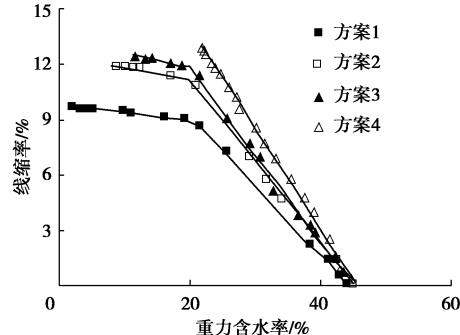


图 1 膨胀土线缩率与重力含水率关系曲线^[2]

Fig. 1 Curves of linear shrinkage and gravity moisture content^[2]

表 4 不同试验方案中土样脱湿速率^[2]

Table 4 Drying rates of different test programs^[2]

土样脱湿试验方案	脱湿速率/(%·h ⁻¹)
方案 1	1.49
方案 2	0.56
方案 3	0.33
方案 4	0.08

2.2 渗透特性

在室内试验中，不同的湿度和温度环境使土样具有不同的脱湿速率，表现出不同的脱湿路径。这导致土样呈现不同的收缩状态，并表现出不同的持水能力^[2]。室内试验设置的脱湿环境与现场的气候条件相接近，所以有必要对土体经过不同脱湿过程导致的边坡降雨入渗特性展开分析。

文献[2]利用非饱和膨胀土的吸附强度与基质吸力关系的幂函数表达式，结合收缩系数和吸附强度可反算出不同脱湿速率下的膨胀土“双线性”土水特征曲线(见图 2)，发现使用体积含水率和基质吸力的关系后，不同脱湿速率时曲线下降段接近平行趋势，脱湿速率越小，膨胀土的进气值越大，相同含水率时的吸力越高。

依据不同脱湿速率影响下的膨胀土土水特征曲线^[2]、干湿循环后土样饱和渗透系数^[8]和非饱和土体渗透曲线的预测方法^[9]获得不同脱湿速率下土体的渗透曲线如图 3。可见，不同脱湿速率下的土水特征曲线表现出不同的分布形式，脱湿速率越小，相同基质吸力下土体的渗透系数越大，以 200 kPa 基质吸力为例，大小两种脱湿速率下的土体渗透系数相差了一个数量级。

3 考虑土体脱湿路径影响的膨胀土边坡雨水入渗计算分析

本文在室内试验的基础上进行边坡雨水入渗特性

表 5 气象数据

Table 5 Meteorological data

日期	温度/℃		相对湿度/%		平均风速 /(m·s⁻¹)	总降雨量/mm	降雨开始时间	降雨结束时间	净辐射量 (MJ·m⁻²·d⁻¹)	潜在蒸发量/mm
	max.	min.	max.	min.						
6月1日	32.9 4	23.6 1	99.9 9	64.9 2	0.73	98.4	12	19	11.31	4.1

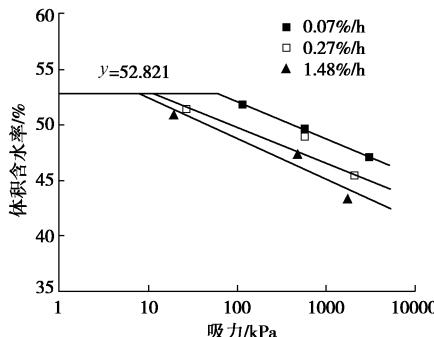
图 2 不同脱湿速率下膨胀土体积含水率和基质吸力关系^[2]

Fig. 2 Relationship between volume water content and matric suction of expansive soils under various drying rates^[2]

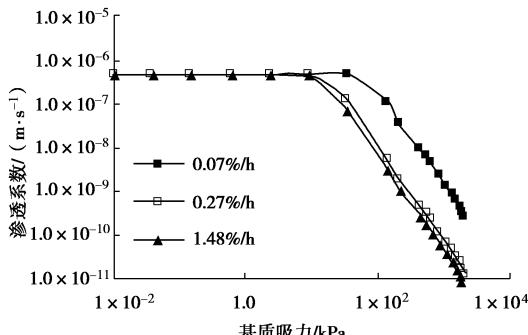


图 3 不同脱湿速率下土体非饱和渗透系数曲线

Fig. 3 Unsaturated permeability curves of soils under different drying rates

分析, 采用湿热耦合非等温流方程, 结合实际降雨、蒸发的边界条件, 分析不同脱湿速率对降雨过程中膨胀土边坡雨水入渗过程的影响, 建立大气—非饱和土相互作用模型, 进行相应计算。

3.1 计算初始条件

不同脱湿速率下土体的土水特征曲线和非饱和渗透曲线见图 2, 3。膨胀土边坡的计算依照文献[7]坡 1 几何尺寸建立模型如图 4。假设边坡土体初始孔隙水压力的分布如图 5。其中, 表面土体基质吸力为 200 kPa, 坡中位置土体孔隙水压力沿深度方向分布如图 6。降雨条件见表 5 中的 6 月 1 日。

3.2 计算结果分析

考虑不同脱湿速率对土体渗透性的影响, 降雨后边坡孔隙水压力的分布见图 7。降雨后膨胀土边坡坡中沿深度方向孔隙水压力分布对比见图 8。可见, 较小的脱湿速率作用下, 降雨后边坡雨水入渗的影响深度较大。前文分析表明, 相同基质吸力下, 脱湿速率较小时, 土体的渗透系数较大, 这导致较大的雨水入

渗深度。数值计算结果说明, 湿度大的气候条件下, 长期的蒸发过程, 会导致更大的降雨入渗深度, 从而不利于膨胀土边坡的稳定。

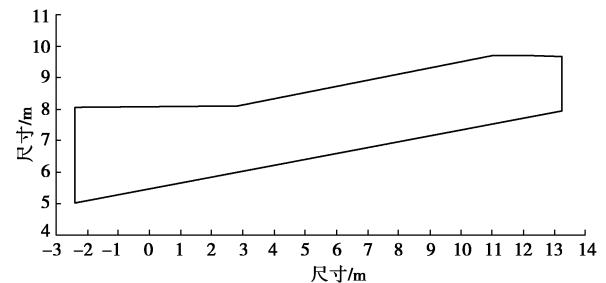


图 4 边坡计算模型几何尺寸

Fig. 4 Geometrical sizes of slope

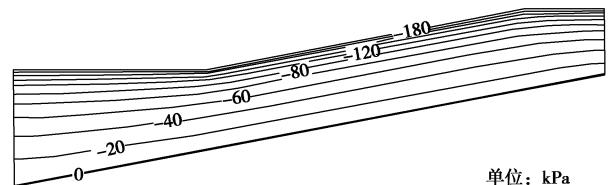


图 5 边坡初始孔隙水压力的分布

Fig. 5 Distribution of initial pore water pressure in cut slope

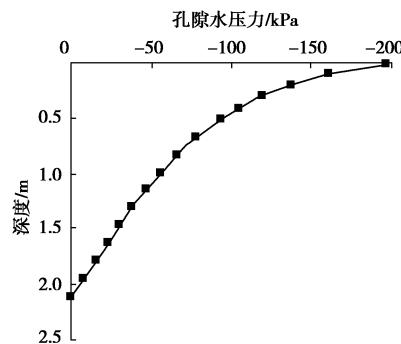
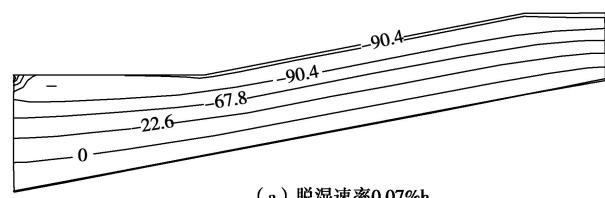
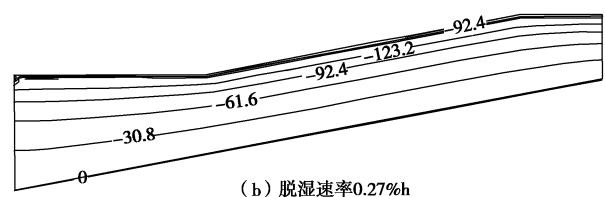


图 6 坡中土体孔隙水压力沿深度方向分布

Fig. 6 Distribution of pore water pressure in cut slope along depth



(a) 脱湿速率 0.07%h



(b) 脱湿速率 0.27%h

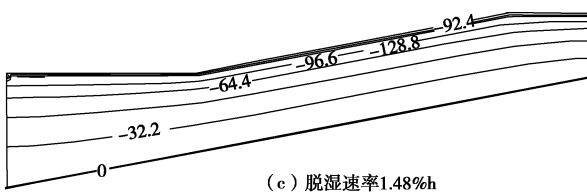


图 7 边坡孔隙水压力分布

Fig. 7 Distribution of pore water pressure in cut slope

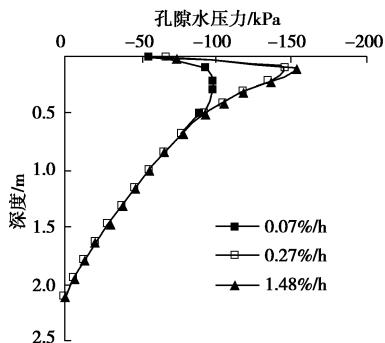


图 8 边坡坡中沿深度方向孔隙水压力分布

Fig. 8 Distribution of pore water pressure in cut slope along depth

4 结 论

(1) 室内试验结果表明：脱湿速率越小，膨胀土收缩变形越大，即使含水率小于其缩限，膨胀土依然会发生一定的收缩变形，其收缩系数与脱湿速率呈现较好的相关性，随着脱湿速率的增加而以幂函数形式逐渐衰减；脱湿速率越小，膨胀土失水后的吸湿膨胀变形也越大，这说明自然条件下湿度大的气候里，经过长期蒸发，表层土体的膨胀潜势会较大。

(2) 考虑土体脱湿速率影响的膨胀土边坡雨水入渗数值计算结果表明：脱湿速率较小时，降雨后边坡雨水入渗的影响深度较大。这说明，湿度大的气候条件下，长期的蒸发过程，会导致更大的降雨入渗深度，从而不利于膨胀土边坡的稳定。

参 考 文 献：

- [1] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国, 等. 吸湿速率对膨胀土工程性状影响的初步分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(增刊): 154 - 157. (LI Xiong-wei, GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, et al. Preliminary analysis of expansive soil engineering behavior considering the effect of wetting rate[J]. Hunan Daxue Xuebao/Journal of Hunan University Natural Sciences, 2008, 35(S0): 154 - 157. (in Chinese))
- [2] 孔令伟, 李雄威, 郭爱国, 等. 脱湿速率影响下的膨胀土工程性状与持水特征初探[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 335 - 340. (KONG Ling-wei, LI Xiong-wei, GUO Ai-guo, et al. Preliminary study on engineering behaviors and water retention characteristics of expansive soil under influence of drying rate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 335 - 340. (in Chinese))
- [3] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [4] NING LU, WILLIAM J LIKOS. Unsaturated soil mechanics[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [5] 龚壁卫, 周小文, 周武华. 干-湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 207 - 209. (GONG Bi-wei, ZHOU Xiao-wen, ZHOU Wu-hua. Test on suction and strength of expansive soil in a desorption-absorption cycle of moisture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 207 - 209. (in Chinese))
- [6] 谢云, 陈正汉, 孙树国, 等. 重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2007(8): 1636 - 1642. (XIE Yun, CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, et al. Test research on three-dimensional swelling pressure of remolded expansive clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(8): 1636 - 1642. (in Chinese))
- [7] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065 - 1073. (KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1065 - 1073. (in Chinese))
- [8] 李雄威, 张鹤年, 张勇. 膨胀土渗透性室内试验与非饱和和渗透系数预测[J]. 四川建筑科学研究, 2011(5): 115 - 118. (LI Xiong-wei, ZHANG He-nian, ZHANG Yong. Lab test and unsaturated coefficient prediction of expansive soil permeability[J]. Sichuan Building Science, 2011(5): 115 - 118. (in Chinese))
- [9] Van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 44: 892 - 898.

(本文责编 黄贤沙)