

# 黏土力学性能及干湿循环下的边坡稳定性数值模拟研究

雷齐善<sup>1</sup>

(长江大学 城建学院 湖北荆州 434023)

**摘要:** 利用数值模拟和剪切实验的研究方法, 在不同干湿循环次数和不同初始干密度的条件下, 受干湿循环作用对黏性土抗剪强度的影响, 对土样的剪切和结构特性进行了研究, 结果表明: 1) 直接剪切试验中, 在第一次干湿循环时, 抗剪强度显著下降, 随着循环次数的增加, 抗剪强度在干燥时比湿透时要大。2) 在数值模拟中, 土质边坡的稳定性随着干湿循环次数的增加而逐渐降低, 随着干湿循环次数的减少而逐渐提高, 同时也增加或减少了边坡的最大移位。3) 当降雨作用下黏土边坡含水量增加时, 边坡最大位移大大增加, 加速度导致边坡不稳定, 受干湿循环影响, 含水量增加, 安全系数显著降低, 导致边坡稳定性明显下降, 同时边坡最大位移也达到极大值。

**关键词:** 抗剪强度; 干湿循环; 边坡稳定性; 数值模拟

中图分类号: TU443 文献标识码: A

## Study on mechanical properties of clay and numerical simulation of slope stability under dry-wet cycles

LEI Qi shan<sup>1</sup>

(Changjiang University, Urban Construction College Jingzhou, Hubei 434023)

**Abstract:** Using the numerical simulation and shear experiments, under the condition of different dry and wet cycle times and different initial dry density, the dry and wet cycle on the shear strength, the shear and structure characteristics of soil samples are studied, the results show that: 1) direct shear test, in the first dry and wet cycle, the shear strength dropped significantly, with the increase of cycle times, the shear strength in dry than wet. 2) In the numerical simulation, the stability of the soil slope gradually decreases with the increase of dry and wet cycles, and gradually increases with the decrease of dry and wet cycles, which also increases or reduces the maximum shift of the slope. 3) When the water content of the clay slope increases under the action of rainfall, the maximum displacement of the slope is greatly increased, and the acceleration leads to the slope instability. Affected by the dry and wet cycle, the water content increases, and the safety factor is significantly reduced, resulting in a significant decrease of the slope stability, and the maximum displacement of the slope also reaches the maximum value.

**Key words:** shear strength; dry-wet cycles; slope instability; numerical simulation

### 1 引言

荆州地区黏土分布广泛, 其黏土颗粒多, 渗透性低, 土体孔隙分布和物理力学性质受干湿循环的影响, 可导致坡体稳定性降低, 是滑坡体的重要诱发因素。所以说, 许多学者研究过土体在经受干湿循环的影响后, 其强度会发生怎样的变化。Stoltz G 等<sup>[1-4]</sup>论述石灰混合中连续干湿循环对黏土力学性能的影响。结果表明, 连续的润湿和干燥循环可以显著改变石灰混合的土体的风化作用。Kalkan<sup>[5]</sup>研究硅肥在干湿循环中经改良的膨胀粘土的膨胀特性。结果发现, 硅肥在干湿循环下, 能减少改性粘土的渐变变形。Chung-Sik<sup>[6]</sup>探讨了花岗岩抗压强度特性受到干湿循环次数的影响, 分析认为随着干湿循环次数的增加, 其抗压强度明显降低。Sayem<sup>[7]</sup>利用扫描电镜研究了多个干湿循环对 SWCC 的影响。SWCC 的研究结果显示, 水分含量和蓄水量随干湿循环周期的增加而下降。Day R W<sup>[8]</sup>研究了干湿循环对压实黏土的影响, 发现当最佳含水量为 6% 时, 压实黏土的初始膨胀和收缩非常小。然而, 经过反复的干湿循环后, 膨胀和收缩的程度显著增加。Yavari<sup>[9]</sup>通过在不同温度下开展直接剪切试验, 研究了土样的剪切和结构特性。研究表明, 温度对土体的抗剪强度和结构作用很小。Gallage<sup>[10]</sup>测量两种低吸力土样的不饱和抗剪强度, 采用改良的常规直接剪切装置。结果表明, 土质含水率及干湿特性对内摩擦角没有明显作用。

综上所述, 干湿循环明显地影响着粘土的结构, 也影响着粘土

的强度。目前, 国内外主要采用室内常规方法实现干湿循环。浇湿土样, 烘箱烘干。相对于干湿循环的自然环境, 有一定的失真现象。环境参数如湿度、温度、空气速度等在干燥过程中是无法控制的。基于以上考虑, 在查阅了荆州地区的气象报告后, 采用人工气象模拟系统对干湿循环过程进行了模拟。

### 2 试验方法

#### 2.1 干湿循环过程

借助人工气象模拟系统, 模拟温度、湿度、气压、雨、风量、太阳辐射等多种气候环境因素, 在此模拟环境下进行相关实验研究。

具体参数如下所示:

雨淋: 温度 21℃, 降雨量 25mm/m<sup>2</sup>, 湿度 98%, 时间 5h;

光照: 温度 38℃, 湿度 60mm/m<sup>2</sup>, 照明 200W/m<sup>2</sup>, 时间 5h。

利用程序分别设置雨淋模式和光照模式, 两种模式交替循环, 干湿循环即为光照-雨淋模式循环。

#### 2.2 试样制备

试验所用黏土土样取自长江大学体育馆附近空地, 取样深度约为 1m。根据《岩土试验规程》, 土样在室内进行了一系列常规试验。

采用 4 个试样, 施加剪切力进行剪切, 分别在不同的法向压力 P=50kPa、100kPa、150kPa、200kPa 的作用下, 求得破坏时的最大剪应力  $\tau$ , 其抗剪力的参数是: 内摩擦角  $\phi$ -p 曲线, 粘聚力 C。具体地说, 制备四个试样为一组, 初含水率统一为 25%, 制备初干密

度分别为 1.50g/cm<sup>3</sup>、1.55g/cm<sup>3</sup>、1.60g/cm<sup>3</sup>，分别进行 0、1、2、3 次干湿循环。每一组试验都在进行干湿循环目标次数之后再行取样，制备共 48 个试样，研究粘性土的抗剪强度和抗剪强度指标的变化规律，以及粘性土在干湿循环次数不同的初始干密度。

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 干湿循环对黏土抗剪强度的影响

轴向荷载一定时，随着干湿循环次数的增加，从总体上看抗剪强度几乎呈递减趋势，这表明荆州粘土的干湿循环次数与抗剪强度呈负相关。未经历过干湿循环的土样抗剪强度明显大于干湿循环后的土样，随着干湿循环次数的增加，抗剪强度持续降低，但都远小于第一次循环后对抗剪强度的影响，也就是说，干湿循环次数对土样抗剪强度的影响主要在第一次，随后的几次对抗剪强度的影响骤减，而后趋于稳定。

#### 3.2 凝聚力与干湿循环次数之间的关系

在同一干湿循环次数水平上来看，随着初始干密度的增大，凝聚力  $c$  一致增大。当处于同样的干密度水平时，凝聚力  $c$  会随着干湿循环次数的增加而一致降低，总的降低幅度趋势是先快后慢。

#### 3.3 凝聚力与干湿循环次数之间的关系

在同样的干密度水平上，内摩擦角  $\phi$  的变化与凝聚力  $c$  相比，随着干湿循环次数的增加，要平缓得多。内摩擦角在初始干密度 1.50g/cm<sup>3</sup> 的情况下， $\phi$  值呈微幅上升趋势，总体上略有上升；初干密度 1.55g/cm<sup>3</sup> 时，内摩擦角  $\phi$  几乎呈线性增加，总体仍略有增加；在初始干密度为 1.60g/cm<sup>3</sup> 的情况下，尽管总体上呈现小幅上升的趋势，但内摩擦角  $\phi$  值却出现了上下波动的变化。在同样的干湿循环次数层次上，内摩擦角随干密度的增加而不断增大。

### 4 边坡数值模拟

选取一个被 Dawson<sup>[11]</sup> 分析的均质黏性土坡作为 ABAQUS 计算模型。该算例已被多位学者验证分析，安全系数计算采用强度折减方法的土坡，其结果与实际基本相符。

采用摩尔库仑本构关系模型，选取干湿循环直接剪切试验的黏结力和内摩擦角作为剪切角和屈服应力。

计算参数的选择如下表 1 所示：

表 1 黏土参数

Table 1 Clay parameters

土体种类	弹性模量 $E$ (MPa)	容重 $\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )	泊松比 $\nu$
黏性土	100	20	0.35

#### 4.1 数值结果分析

##### 4.1.1 干湿循环对边坡变形和稳定性的影响分析

干湿循环次数为 0、1、2、3 次时的黏性土坡最大位移分别为 56.84mm、63.01mm、63.7mm、68.01mm，相比于第 0 次干湿循环，第 1、2、3 次干湿循环的黏性土坡最大位移增加了 10.86%、10.96%、19.65%。由此可知，当黏性土坡经历多次干湿循环作用时，会导致边坡最大位移量增大，可见干湿循环作用对黏性土坡的稳定有着重要的作用。

与初始干密度为 1.60g/cm<sup>3</sup> 时相比，初始干密度为 1.55g/cm<sup>3</sup>、1.50g/cm<sup>3</sup> 时的边坡安全系数分别下降了 19.8%、37.3%，这说明干密度的变化对边坡稳定性的影响非常重要，而且随着干密度的下降，边坡安全系数明显下降。

相比于初始干密度为 1.60g/cm<sup>3</sup>，初始干密度为 1.55g/cm<sup>3</sup>、1.50g/cm<sup>3</sup> 时的黏性土坡最大位移增加了 91.4%、138.5%。由此可知，当黏性土坡受到干湿循环作用干密度降低时，会导致边坡最大位移大幅增大，加速导致边坡失稳。

### 5 结论

利用人工气象模拟系统模拟干湿循环条件，根据实验室试验参数对边坡稳定性研究的数值模拟，对粘土土强度进行直接剪切试验，研究内摩擦和粘聚力在干湿循环条件下的变化规律，得出如下结论：

(1) 循环数对其剪切强度的影响在第一次循环中最为明显，且剪切强度显著降低。经过 3 个周期之后，抗剪力度逐步减小，趋于平稳。这是因为土壤的含水量在第一个循环中波动剧烈，内部结构明显受到破坏，导致裂缝的形成，土壤的强度大大降低。随着循环次数的增加，逐渐形成了二次裂纹，但土体强度衰减的程度较小，因此，土体的二次裂纹。

(2) 粘土边坡随着干湿循环次数的增加，经过多次干湿循环，边坡最大位移也会增加，其安全系数逐渐降低。由此可见，干湿循环对粘土边坡的稳定性有着举足轻重的作用。当降雨作用下粘土边坡含水量增加时，边坡最大位移大大增加，加速度导致边坡不稳定，受干湿循环影响，含水量增加，安全系数显著降低，导致边坡稳定性明显下降，同时边坡最大位移也达到极大值。

### 参考文献 References

- [1] Sayem Hossain Md, Kong L W, Yin S. Effect of Drying/Wetting Cycles on Saturated Shear Strength of Undisturbed Residual Soils[J]. American Journal of Civil Engineering. Vol. 4, No. 4, 2016, pp. 143–150
- [2] Goh S G, Rahardjo H, Leong E C. Shear Strength of Unsaturated Soils under Multiple Drying–Wetting Cycles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 140(2):1–5
- [3] Liu W H, Sun X L. Comparison of two drying/wetting methods for assessing the influence of drying/wetting on the mechanical cyclic behaviors of soils[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2017, 3:297–303
- [4] Stoltz G, Cuisinier O, Masroufi F. Clay soils treated with lime are weathered by wet–dry cycles[J]. Engineering Geology, 2014, 181:281–289
- [5] Kalkan E. Impact of wetting – drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume[J]. Applied Clay Science, 2011, 52(4):345–352
- [6] Yoo C S. Effect of Cyclic Drying–Wetting on Compressive Strength of Decomposed Granite Soils[J]. Journal of Korean Geosynthetic Society, 2011. 10(19–28)
- [7] Sayem H M, Kong L W. Effects of Drying–Wetting Cycles on Soil–Water Characteristic Curve[J]. International Conference on Power Engineering & Energy, Environment, 2016(PEEE 2016)
- [8] Day R W. Swell–shrink behavior of compacted clay[J]. Journal of geotechnical engineering, 1994. 120(3):618–623
- [9] Yavari N, Tang A M, Pereira J M, et al. Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil–structure interface[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016. 53(7):1186–1194
- [10] Gallage C, Uchimura T. Direct shear testing on unsaturated silty soils to investigate the effects of drying and wetting on shear strength parameters at low suction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016. 142(3):401–508
- [11] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999. 49(6):835–840

### 第一作者及通讯作者：

雷齐善，( ORCID : 0009-0007-0720-8997 )，E-mail : 386702537@qq.com