

文章编号: 1673-9469 (2019) 04-0019-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.004

大气影响层含水率变化对下蜀土边坡稳定性的影响分析

王威¹, 刘顺青^{2*}, 杨正玉¹, 汪兵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 212005)

摘要: 针对大气影响层含水率变化对下蜀土边坡稳定性的影响, 以镇江跑马山边坡中的下蜀土为试样, 通过直剪试验获取了大气影响层现场含水率变化范围内下蜀土的抗剪强度指标, 同时结合现场探槽试验获得大气影响深度, 采用有限元极限分析软件 OPTUM G2 分析了大气影响层含水率变化对下蜀土边坡稳定性的影响规律。结果表明: 随着大气影响层含水率的增大, 下蜀土边坡的潜在滑动面逐渐从深层向浅层转变; 下蜀土边坡下、上限安全系数绝对衰减率的最大值都在 17% 左右。

关键词: 下蜀土边坡; 含水率; 稳定性; 大气影响层; 抗剪强度

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

Stability Analysis of Xiashu Soil Slope under the Moisture Content Change of Atmospheric Influence Layer

WANG Wei¹, LIU Shunqing^{2*}, YANG Zhengyu¹, WANG Bing¹, WU Lihao¹

(1.The 3rd Geological Brigade of Jiangsu Geology & Mineral Exploration Bureau, Zhenjiang, Jiangsu 212001, China; 2.School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212005, China)

Abstract: The Xiashu soil slopes in Zhenjiang area collapse in different degrees caused by the moisture content change of atmospheric influence layer. The shear strength parameters under different moisture content of Xiashu soil taken from Zhenjiang Paomashan slope are measured by direct shear test. The atmospheric depth of Xiashu slope is determined by using field grooving test. On the basis of the above, the stability of Xiashu soil slopes considering the influence of water content change is analyzed by using finite element limit analysis software OPTUM. The computing results indicate that the sliding surfaces of Xiashu soil slopes gradually change from the deep layer to shallow layer with the increase of water content. The absolute attenuation rate of lower and upper limit safety factors of Xiashu soil slopes reaches about 17% with the increase of moisture content.

Key words: Xiashu soil slope; moisture content; stability; atmospheric influence layer; shear strength

下蜀土在我国广泛分布于长江中下游地区的岗地、丘陵等地貌单元中^[1], 镇江地区的下蜀土边坡雨季常会发生不同程度的滑塌现象, 其在大气影响层内水敏感性较为显著。不同学者对不同含水条件下土体的强度特性进行了研究, 如党进谦等^[3]研究了不同含水率条件下黄土的强度特性; 李保雄等^[4]

研究了不同沉积年代黄土的水敏感性与应力-应变特性; 赵颖文等^[5]研究了广西原状红黏土的胀缩特性与孔径分布随脱湿过程的演化规律; 刘顺青等^[6]研究了高液限土和红黏土的水敏感性。目前, 有关下蜀土的研究主要选取在南京地区^[7-8], 而镇江地区下蜀土抗剪强度的水敏感性研究偏少。

收稿日期: 2019-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579119); 江苏省地质矿产勘查局科研项目(2018KY03); 江苏省地质勘查专项资金项目(2018)

作者简介: 王威(1978-), 男, 河南信阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害方面的研究。* 通讯作者: 刘顺青(1985-), 男, 江苏仪征人, 博士, 在站博士后, 主要从事边坡稳定性方面的研究。

关于下蜀土边坡稳定性方面,梅岭等^[9]结合镇江地区非饱和和下蜀土的室内试验,分析了不同雨强、地下水位情况下的降雨入渗,得到了非饱和和下蜀土边坡在降雨入渗下的若干规律;李振江等^[10]以南京燕子矶太平村75-4号滑坡应急抢险工程为例,采用Geostudio研究了连续暴雨状态下南京地区下蜀土滑坡的失稳机制及应急处置方法;孙萍等^[11]以南京市某下蜀土边坡工程为研究对象,根据室内试验得到的土体抗剪强度及非饱和土土水特征曲线,利用ABAQUS软件分析了边坡处于饱和及不饱和状态下的稳定性规律;孙少锐等^[12]基于颗粒流方法,对位于南京市挹江门街道旅游学校西侧山体的下蜀土滑坡进行了数值模拟,研究其变形破坏及滑动全过程。本文拟以镇江跑马山边坡体中的下蜀土为试样,通过直剪试验获取了大气影响层现场含水率变化范围内下蜀土的抗剪强度指标,结合现场探槽试验获得大气影响深度,采用有限元极限分析软件OPTU G2分析了大气影响层含水率变化对下蜀土边坡稳定性的影响规律。研究结果为下蜀土边坡的设计、施工以及养护治理提供了依据,具有一定的工程意义。

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跑马山边坡。镇江跑马山下蜀土颗粒组成成分如表1所示。由表1可知,土样中粒径小于0.075 mm的细粒组含量占80.6%。通过常规的土工实验,土样的其他主要指标如下:液限为30.7%,塑限为18.4%,塑限指数为12.3。按照国家标准^[13],所用镇江跑马山下蜀土为粉质黏土。

表1 镇江跑马山下蜀土的颗粒组成
Tab.1 Grain size composition of Xiashu loess of Zhenjiang Paomashan

| 粒径/mm | 含量/% |
|--------------|------|
| 1 ~ 0.5 | 1.9 |
| 0.5 ~ 0.25 | 9.6 |
| 0.25 ~ 0.075 | 7.9 |
| < 0.075 | 80.6 |

1.2 测试方法

为获得大气影响层现场含水率范围内下蜀土的抗剪强度指标,下蜀土制样干密度取为1.60 g/cm³,

控制试样的含水率分别为12.1%、14.3%、15.7%、17.2%、18.0%、18.9%、19.5%、20.9%、22.0%,每个含水率组制备4个试样。试验时的上覆压力分别取100、200、300和400 kPa。主要试验结果见表2。

表2 不同含水率的下蜀土的抗剪强度指标
Tab.2 Strength index of Xiashu soil under different moisture content

| 干密度/(g·cm ⁻³) | 含水率/% | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/° |
|---------------------------|-------|---------|--------|
| 1.60 | 12.1 | 54.5 | 30.1 |
| | 14.3 | 52.9 | 28.1 |
| | 15.7 | 50.7 | 27.5 |
| | 17.2 | 48.3 | 25.4 |
| | 18.0 | 46.6 | 22.2 |
| | 18.9 | 45.4 | 18.1 |
| | 19.5 | 43.8 | 17.2 |
| | 20.9 | 42.6 | 12.7 |
| | 22.0 | 41.3 | 11.3 |

1.3 试验结果分析

1.3.1 不同含水率的下蜀土的黏聚力

不同含水率的下蜀土的黏聚力曲线如图1所示。从图1中可以看出,随着含水率的增加,下蜀土的黏聚力呈减小趋势。下蜀土的黏聚力与含水率之间关系近似用线性函数表示为:

$$c = 72.76 - 1.44w, 12 \leq w \leq 22 \quad (1)$$

式(1)中, c 为黏聚力,kPa; w 为含水率,%。

1.3.2 不同含水率下下蜀土的内摩擦角

不同含水率下下蜀土的内摩擦角曲线如图2所示。从图2中可以看出,含水率对下蜀土的内摩擦角影响较大。下蜀土的内摩擦角与含水率之间的关

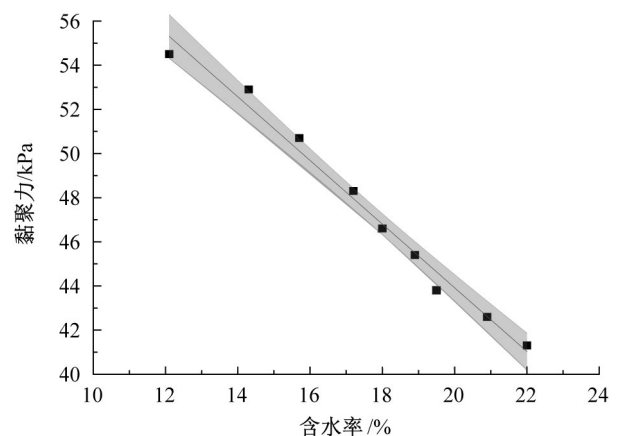


图1 不同含水率下下蜀土的黏聚力曲线
Fig.1 Curve of cohesion of Xiashu soil under different moisture content

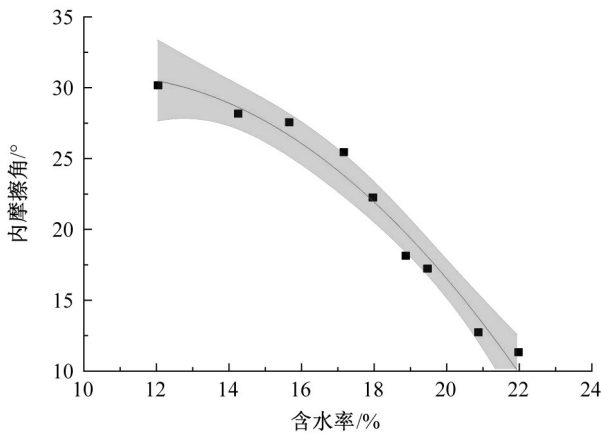


图2 不同含水率下下蜀土的内摩擦角曲线
Fig.2 Curve of internal friction angle of Xiashu soil under different moisture content

系近似用二次函数表示为：

$$\varphi = 12.88 + 3.39w - 0.16w^2, 12 \leq w \leq 22 \quad (2)$$

式(2)中， φ 为内摩擦角，°； w 为含水率，%。

2 下蜀土边坡的大气影响深度

大气对土体湿度的影响随深度的增加而逐渐减弱，当达到某一临界深度时将不再受干湿循环的影响^[14]，将该临界深度称为大气影响深度。本文采用土体的湿度系数来分析计算下蜀土边坡的大气影响深度。

通过试验测得本文下蜀土的自由膨胀率为48%，且下蜀土主要以伊利石和高岭石的黏土矿物为主，可见本文所研究的下蜀土具有弱膨胀性。

根据GB50112-2013^[15]，土体湿度系数与大气影响深度的数值关系如表3所示。

表3 大气影响深度
Tab.3 Atmosphere influence depth

| 土体湿度系数 ψ_w | 大气影响深度 /m |
|-----------------|-----------|
| 0.6 | 5.0 |
| 0.7 | 4.0 |
| 0.8 | 3.5 |
| 0.9 | 3.0 |

土体湿度系数 ψ_w 的公式如式(3)所示：

$$\psi_w = \frac{w_{min}}{w_p} \quad (3)$$

式(3)中， w_{min} 为地表下1m深度处土体含水率可能达到的最小值， w_p 为地表下1m处土体的塑限。

为获得1m深度处土体的含水率，在下蜀土边坡后缘开挖1个探槽，测试得到探槽1m深度处土体在3、7、9、10、11、12月份情况下4个方向的含水率，并将4个含水率取平均值，如表4所示。

表4 1m深度处土体含水率
Tab.4 Moisture content of soils at the depth of 1 m

| 月份 | 下蜀土边坡后缘1m深处平均含水率 /% |
|----|---------------------|
| 3 | 15.1 |
| 7 | 22.4 |
| 9 | 22.7 |
| 10 | 21.9 |
| 11 | 17.5 |
| 12 | 12.8 |

通过式(3)计算下蜀土的湿度系数：

$$\psi_w = \frac{w_{min}}{w_p} = 0.696 \quad (4)$$

根据计算所得到的湿度系数为0.7，查表3得到研究区的大气影响深度约为4.0m。

3 下蜀土边坡浅层稳定性计算

3.1 计算模型的建立

镇江跑马山地区的下蜀土边坡高度都不超过15m，因此本文选取下蜀土边坡高度为15m、坡度为45°作为计算的几何参数。稳定性计算采用有限元极限分析软件OPTUM G2，下蜀土边坡有限元极限分析计算模型如图3所示。

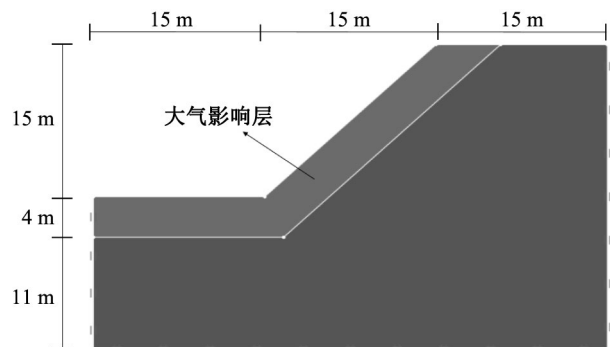


图3 下蜀土边坡有限元极限计算模型图

Fig.3 Curve of finite element limit analysis calculation model of Xiashu soil slope

3.2 本构模型与计算参数的选取

本文下蜀土边坡浅层稳定性计算时本构模型采用摩尔-库仑模型。很多文献认为弹性模量对边坡安全系数的影响不大^[16-17]，泊松比 ν 应满足以下公式：

$$\sin\phi \geq 1 - 2\nu \quad (5)$$

通过固结排水剪切试验测得该下蜀土的弹性模量 $E=35 \text{ Mpa}$ ，泊松比 $\nu=0.37$ 。所以本文选取弹性模量 $E=35 \text{ Mpa}$ ，泊松比 $\nu=0.37$ 作为边坡稳定性计算参数。大气影响层以下下蜀土的现场天然含水率接近 20.9%，所以可取含水率为 20.9% 时的强度参数。

3.3 边坡稳定性分析方法

本文有限元极限分析软件 OPTUM G2 在计算下蜀土边坡稳定性时，采用强度折减法，边坡的安全系数为：

$$F_s = \frac{\tan\phi}{\tan\phi_{cr}} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (6)$$

式(6)中， c_{cr} 和 ϕ_{cr} 为下蜀土边坡处于临界滑动状态时岩土体的黏聚力和内摩擦角， c 和 ϕ 为岩土体的黏聚力和内摩擦角。

图 4 中给出了采用有限元下限法计算下蜀土边坡安全系数的分析流程。安全系数上限法与此类似，上限解输出改为 F_{smax} 。TOL 为收敛精度，论文中取 0.001。

3.4 计算结果分析

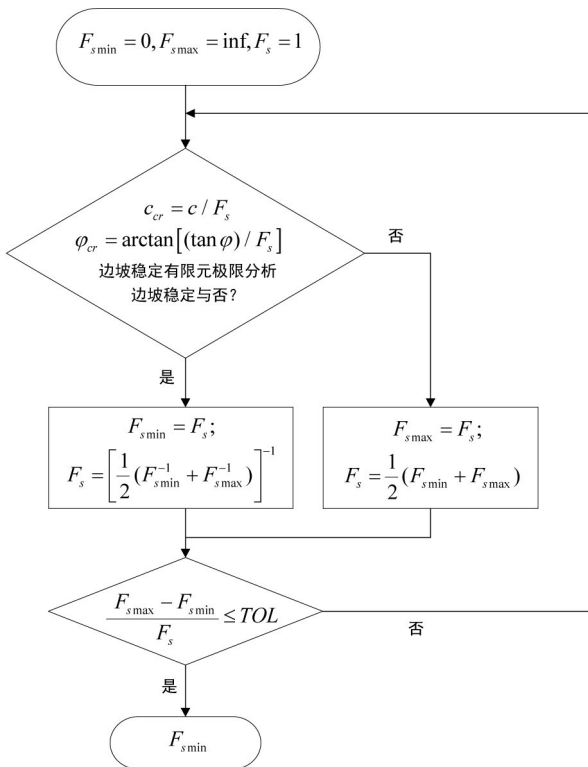


图 4 下蜀土边坡有限元下限安全系数的分析流程
Fig.4 Analysis flow of lower limit safety factor of Xiashu soil slope

3.4.1 不同含水率下下蜀土边坡的剪切耗散图

采用有限元极限分析法对不同含水率下下蜀土边坡的稳定性进行了分析，得到了各含水率下下蜀土边坡的剪切耗散(塑性变形指标)图，本文选取了不同含水率下的下限剪切耗散图，如图 5 所示。由图 5 可以看出：随着含水率的增大，下蜀土边坡的潜在滑动面逐渐从深层向浅层转变，当下蜀土边坡的大气影响层接近饱和时，边坡的潜在滑动面越来越接近大气影响层。可见，大气影响层含水率变化对下蜀土边坡的稳定性具有重要影响。

3.4.2 不同含水率下下蜀土边坡的稳定安全系数

大气影响层内不同含水率下下蜀土边坡的下、上限安全系数如图 6 所示。从图 6 中可以看出，当大气影响层含水率在 12.1% ~ 22.0% 之间变化时，下蜀土边坡的下限安全系数从 1.575 减小到了 1.312，上限安全系数从 1.624 减小到了 1.347。

4 含水率变化对下蜀土边坡安全系数绝对衰减率的影响分析

为定量分析大气影响层含水率变化对下蜀土边坡安全系数的影响，给出下蜀土边坡安全系数的绝对衰减率 Δ_i 定义：

$$\Delta_i = \frac{|F_i - F_0|}{F_0} \times 100\% \quad (7)$$

式(7)中， F_i ， F_0 分别为大气影响层不同含水率与最小含水率时下蜀土边坡的安全系数。

为使问题更清晰，按式(7)分别计算了大气影响层内不同含水率下下蜀土边坡安全系数的绝对衰减率，计算结果如图 7 所示。从图 7 可以看出，当大气影响层含水率在 12.1% ~ 22.0% 变化时，下蜀土边坡下限安全系数的绝对衰减率在 0 ~ 16.7% 变化，上限安全系数的绝对衰减率在 0 ~ 17.1% 变化，相同含水率的下、上限安全系数的绝对衰减率差别不大。可见，大气影响层含水率变化对下蜀土边坡的稳定性影响较大。所以对于天然及治理后的下蜀土边坡应做好坡面防水工作，尽量减小大气影响层内含水率的变化，以防下蜀土边坡滑坡的发生。

5 结论

1) 随着含水率的增加，下蜀土的黏聚力和内摩擦角分别呈直线及二次函数型减小趋势。

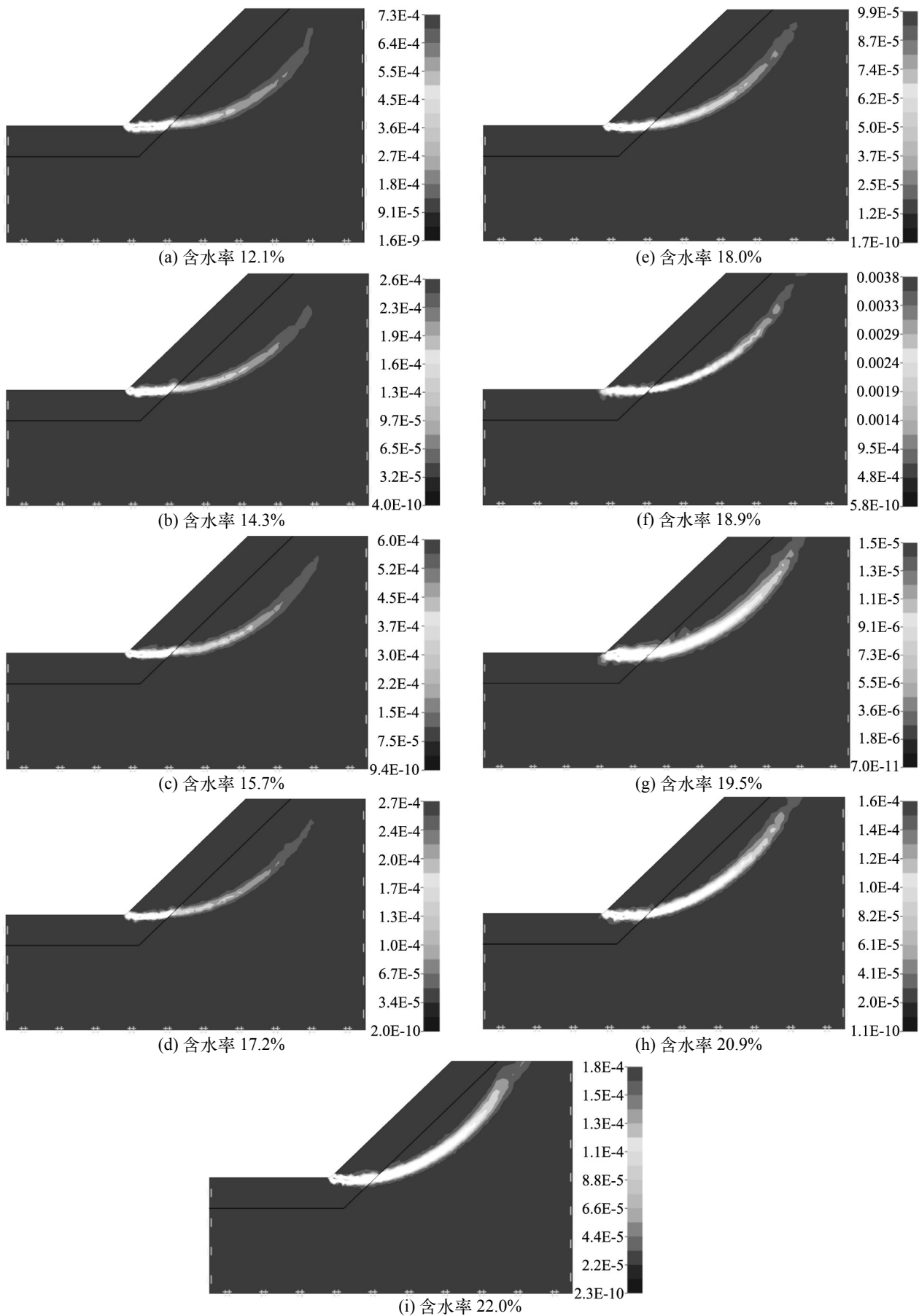


图 5 不同含水率下下蜀土边坡的下限剪切耗散图

Fig.5 Lower bound shear dissipation diagram of Xiashu soil slopes under different water contents

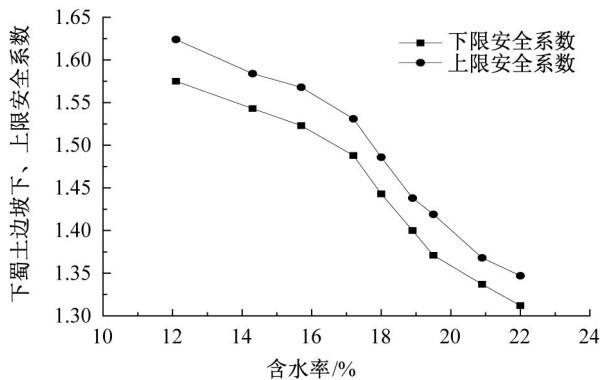


图6 不同含水率下下蜀土边坡的下、上限安全系数

Fig.6 Lower and upper limit safety factor of Xiashu soil slopes under different moisture content

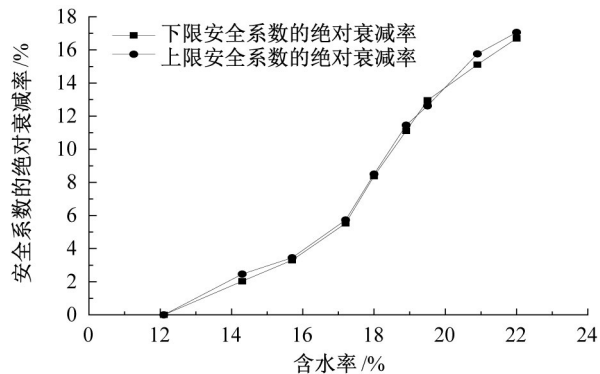


图7 不同含水率下下蜀土边坡安全系数的绝对衰减率

Fig.7 Reduction ratio of safety factor of Xiashu soil slopes under different moisture content

2) 通过现场探槽试验, 计算得到了研究区下蜀土的温度系数, 从而确定了研究区的大气影响深度约为 4.0 m。

3) 当大气影响层含水率在 12.1% ~ 22.0% 变化时, 下蜀土边坡的下、上限安全系数分别在 1.575 ~ 1.312、1.624 ~ 1.347 变化; 下、上限安全系数绝对衰减率的最大值都在 17% 左右, 可见, 大气影响层含水率变化对下蜀土边坡的稳定性存在着明显的影响。

参考文献:

- [1] 郑乐平, 胡雪峰, 方小敏. 长江中下游地区下蜀黄土成因研究的回顾 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(1): 54-57.
- [2] 高国瑞, 韩爱民. 论中国区域性土的分布和岩土性质

的形成 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 511-515.

- [3] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土的强度特性 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 56-61.
- [4] 李保雄, 苗天得. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1003-1008.
- [5] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西原状红黏土力学性状与水敏性特征 [J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 568-572.
- [6] 刘顺青, 洪宝宁, 方庆军, 等. 高液限土和红黏土的水敏感性研究 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2013, 30(1): 78-83.
- [7] 韩爱民, 李彤, 章磊, 等. 南京下蜀土水敏感性特征的试验研究 [J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2015, 37(6): 81-86.
- [8] 施威, 魏继红, 宋京雷, 等. 含水率对下蜀土抗剪强度的影响 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2016, 35(3): 97-101.
- [9] 梅岭, 赵攀, 李鹏. 镇江地区非饱和膨胀土边坡在降雨入渗下的稳定性分析 [J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2015, 29(3): 303-306.
- [10] 李振江, 孙少锐, 宋京雷, 等. 连续暴雨状态下下蜀土滑坡失稳机制分析及应急处置 [J]. 河南科学, 2016, 34(7): 1140-1147.
- [11] 孙萍, 薛涛, 孙雪. 非饱和下蜀土边坡稳定性数值分析研究 [J]. 河南科学, 2017, 35(4): 584-589.
- [12] 何振杰, 孙少锐, 宋京雷, 等. 基于颗粒流方法的典型下蜀土边坡滑动过程分析 [J]. 水电能源科学, 2019, 37(2): 135-138.
- [13] GB50021-2009, 岩土工程勘察规范 [S].
- [14] 余飞, 陈善雄, 许锡昌, 等. 合肥地区膨胀土路基处置深度问题探讨 [J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1963-1966.
- [15] GB50112-2013, 膨胀土地区建筑技术规范 [S].
- [16] GIFFITHS D V, LANE P A. Slope Stability Analysis by Finite Element [J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [17] CHENG Y M, LANSIVAARA T, WEI W B. Two-dimensional Slope Stability by Limit Equilibrium and Strength Reduction Methods [J]. Computers and Geotechnics, 2006, 37(3): 137-150.

(责任编辑 李新)