

【工程应用】

考虑降雨入渗的良渚古城老虎岭遗址 边坡稳定性分析

董梅¹, 郭青岭², 孔梦悦², 杨鑫², 吕亚歌²

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 杭州良渚古城遗址世界遗产监测管理中心, 浙江 杭州 311113)

摘要: 潮湿环境土遗址在发掘后将长期处于高含水和干湿交替状态, 赋存环境恶劣, 遭受多种环境地质病害, 常出现较多的宏微观变形现象。非饱和状态下处于稳定状态的土质边坡遇到降雨时由于基质吸力的降低、渗流力的增大导致安全系数逐渐降低, 可能导致边坡的失稳。本文采用了考虑基质吸力影响的边坡安全系数计算方法对良渚古城遗址外围水利系统的老虎岭遗址剖面开展了边坡稳定性数值模拟分析, 分析工况取决于研究场地的实际降雨监测数据, 计算结果更能指导土遗址的科学保护。

关键词: 土遗址; 边坡稳定性; 有限元分析

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)03-0231-07

Slope stability analysis of Laohuling site in Archaeological Ruins of Liangzhu city considering real rainfall conditions

DONG Mei¹, GUO Qing-ling², KONG Meng-yue², YANG Xin², LV Ya-ge²

(1. Department of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Hangzhou Archaeological Ruins of Liangzhu City World Heritage Monitoring and Management Center, Hangzhou 311113, China)

Abstract: The excavated earthen sites in humid environment are exposed to water dry and wet conditions if neglected for a long time period. Normally, they are subjected to a variety of environmental geological diseases. Many macro and micro deformation phenomena are surveyed in such a hostile environment. Thus, the safety factor for the unsaturated soil slope decreases gradually due to the decrease of matric suction and the increase of seepage force, which may lead to the slope instability. In this paper, the calculation method of slope safety factor considering the influence of matric suction is adopted to carry out the numerical simulation analysis of slope stability on the exposed section of Laohuling site in the Archaeological Ruins of Liangzhu city, Hangzhou. The analysis condition depends on the actual rainfall monitoring data of the research site, and the calculation results can better guide the scientific protection of the earthen site.

Key words: earthen site; slope stability; finite element analysis

0 引言

在我国漫长的历史演变过程中, 祖先给我们留下了大量的文化遗产, 土遗址是其中重要的一部分^[1]。与石质建筑和木结构建筑相比, 土遗址在质地上有着致命的弱点, 因为土遗址的建筑材料是生土、夯土、土坯、刹泥等, 已发掘的土遗址长期暴露于自然环境中极易遭受风、雨、温度变化、地下水、围岩、可溶盐等的侵蚀破坏^[2,3], 出现如收缩开

裂、膨胀崩解、裂隙、粉化、泛碱、霉变、雨蚀等^[4-7]各种损害。良渚古城遗址(位于浙江省杭州市余杭区, 距今5300—4300年)处于南方潮湿地区, 遗址长期处于高含水和干湿交替状态, 赋存环境非常恶劣, 遭受多种环境地质病害, 病害发生的过程和影响因素极为复杂。其中, 老虎岭遗址是良渚古城遗址外围水利系统的重要组成部分, 自发掘以来, 遗址土质剖面直接暴露在空气中, 受环境影响较大, 出现较多的宏微观变形现象。

目前,有关潮湿环境土遗址的保护研究主要集中在防水加固材料^[8,9]中,其他的研究方向包括病害成因探索^[10,11]、潮湿环境概念探索^[12]、考古探方保护^[13]、土遗址监测技术和数据分析^[14,15]等方面,针对土遗址边坡稳定性的研究较少。非饱和状态下处于稳定状态的土质边坡遇到降雨时由于基质吸力的降低或消失可能导致边坡的失稳,而潮湿环境土遗址的保护也主要是水的问题^[3]。在对老虎岭遗址的长期监测数据进行分析,以及多次现场调研,发现遗址本体稳定性受地表水径流和地下水渗流影响较大。因此,本文将考虑老虎岭遗址的实际降雨数据,开展不同降雨入渗条件下遗址剖面的稳定性数值模拟分析,为土遗址的科学保护提供一定科学依据。

1 研究场地介绍

1.1 遗址概况

良渚古城遗址位于浙江省杭州市余杭区瓶窑镇,包含了良渚先民建造的城址、外围水利系统、分等级墓地以及以玉器为代表的出土器物等四类承载了“良渚古城遗址”突出普遍价值的人工遗存要素及其周边环境,2019年被列入世界文化遗产名录。

老虎岭遗址隶属于良渚遗址中的谷口高坝区,为良渚古城外围的水利系统的重要构成,位于城址区西北约11 km处,沿东西向分布于山体间的两座谷口中。2015年,浙江省文物考古研究所对老虎岭遗址坝体北侧早年取土破坏形成的断面进行了整体剖面,发现在坝体的关键位置采用草裹泥堆筑的方式,剖面可见明显的块垄状,清晰地显示出坝体堆筑的结构和层次;并对其进行了C14年代测定,证实了其修建于3 100—3 000 BC,连续使用至2 600 BC,属于良渚文化中后期至晚期早段遗存。

老虎岭遗址剖面整体呈现倒“U”形。根据剖面所处的方位,可以分为3段:东剖面、南剖面、西剖面(图1)。东剖面为西南至东北走向,面向西北方位,长约14 m,相对高度2.1~4.1 m;南剖面为东南至西北走向,面向东北方位,长约33 m,相对高度3.2~5.9 m,为主要挖掘剖面;西剖面为南至北走向,面向东方位,长约18.7 m,相对高度2.9~4.1 m。遗址壁面整体较为陡直,壁面倾角55°~70°,土体承受的下滑力较大。尤其是剖面中部偏东区域下部土体流失,造成斜坡下部内凹变形,中部外凸。失稳区域最长15 m、最宽2.6 m,面积约29.8 m²,

土体外凸约40 cm。对这一区域开展的边坡稳定性分析的结果表明,从整体上看,边坡尚能维持稳定,但由于边坡下部的变形破坏和边坡上部的植被根系、渗水破坏等的影响,边坡表面的抗剪能力已被大幅削弱,坡口土体在强降雨条件下或长时间降雨条件下可能出现浅层滑坡。



图1 老虎岭遗址剖面示意图

Fig. 1 Overview of the section of Laohuling site

1.2 水文及地质条件

良渚古城遗址位于长江下游的环太湖地区南部,地处浙西丘陵山地(天目山余脉)与杭嘉湖平原的过渡地带,平原地区海拔一般为3~5 m,低山丘陵岗地海拔多为20~50 m,地势总体呈现西北高,东南低的趋势。2020年7月对老虎岭遗址钻探取样发现,遗址本体主要由粉质黏土组成,钻探至15.2 m发现强风化砂岩(见表1)。

表1 钻孔岩性记录表

Table 1 Lithological description of borehole

起止深度/m	岩性描述
0~5.1	含砾粉黏
5.1~13.1	含砂粉黏
13.1~15.2	含砾粉黏
15.2~16.4	强风化砂岩
16.4~18.0	中风化砂岩

区域地表径流的补给源主要是降水,故年径流量的区域分布、年际总量变化、年内分配比例与降雨量情况相似。春秋两季降雨量大,地表径流流量较大,水位升高;夏冬两季降雨量少,地表径流流量减少,水位降低。降雨量与地表径流流量随季节变化较大。遗址所处天目山系是浙江省最大的暴雨中心,余杭区年平均雨量1 150~1 550 mm,年平均水面蒸发量681.5 mm,降水主要集中在5—9月,占年降水量的60%以上。

2 边坡稳定性计算

2.1 计算原理与方法

非饱和状态下处于稳定状态的土质边坡遇到降雨时由于基质吸力的降低、渗流力的增大导致安全系数逐渐降低,可能导致边坡的失稳。研究表明

应用非饱和土有效应力原理, 合理选取参数, 同时考虑水的渗流与边坡内力进行耦合计算, 可准确反映降雨过程中边坡安全系数的变化规律^[16-17], 在边坡稳定性数值模拟软件中, PLAXIS 和 Geo-Studio 中都可以实现非饱和土的计算。本文的数值计算在 PLAXIS 3D 软件中进行, 边坡稳定性计算耦合了非饱和土渗流计算和安全系数的强度折减有限元计算, 采用破裂面贯通作为失稳判据。

在非饱和土渗流计算中, 基质吸力是重要影响因素^[18], 但基质吸力的测量比较困难, 且难以得到较为准确的结果。研究发现, 非饱和土的体积含水率、渗透系数和基质吸力都会随着饱和度而变化, 它们之间的关系可用土-水特征曲线和渗透性函数来表达, 更有利于在实际工程中的应用^[19]。在 PLAXIS 软件中内置了 Van Genuchten 材料模型, 可通过输入室内试验获得的土层颗粒级配, 得到对应的水-土特征曲线和渗透性函数进行计算。

2.2 计算模型

在 PLAXIS 3D 中建立如图 2 所示的计算模型, 分析模型范围取 75 m×30 m×12.5 m (长×宽×高), 单元数 3 481 个, 节点数 5 924。在模型的底面处施加固定约束, 在模型的侧面处施加水平约束。数值模型的尺寸参数选取的是图 1 中南剖面的真实尺寸, 从现场的三维激光扫描点云数据中获取。

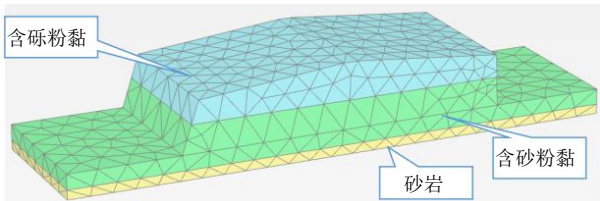


图 2 数值计算模型

Fig. 2 Numerical simulation model

2.3 计算参数

根据现场勘察, 将工程场地内地层进行概化划分为三层。边坡风化基岩上的一层含砾粉黏厚度很小, 在数值模型中进行了简化。计算中的材料模型选用莫尔-库伦 (M-C) 强度准则, 各层土体参数取值由室内土工试验确定, 详见表 2。由于风化基岩上土层均为粉质黏土, 因此采用同一种颗粒级配曲线进行数值计算, 由室内试验确定, 详见图 3, 其中纵坐标表示小于某粒径的土的质量百分比, 横坐标表示土的粒径的对数值。PLAXIS 软件中内置了基于 Van Genuchten 材料模型, 可以输入土层颗粒级配, 得到对应的渗透性函数 (图 4a) 和土-水特

征曲线 (图 4b)。图 4 中 K_r 表示相对渗透系数, S_r 表示饱和度, Ψ 表示基质吸力水头。

表 2 计算参数
Table 2 Mechanical parameters of soil

土层	天然重度/ (kN/m ³)	压缩模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ (kN/m ²)	内摩擦 角/(°)
含砾粉黏	19.8	4.7	0.30	27	18
含砂粉黏	19.7	4.5	0.30	27	18
风化砂岩	20.0	200.0	0.25	140	35

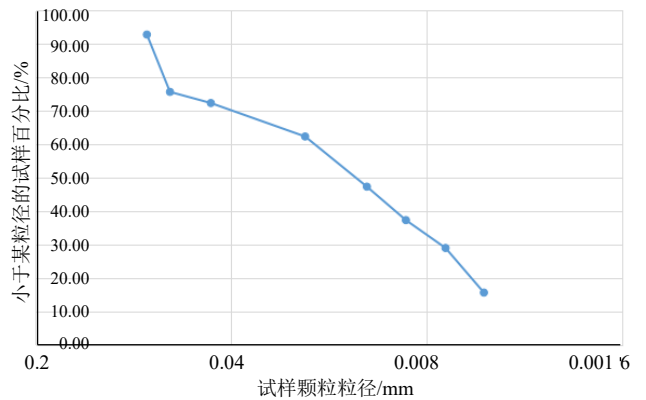
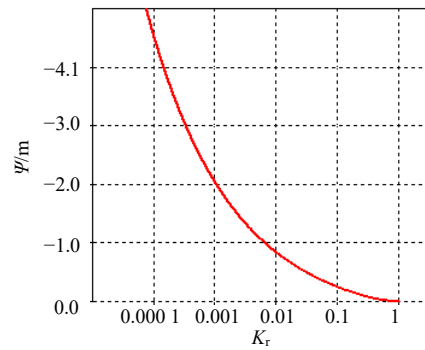
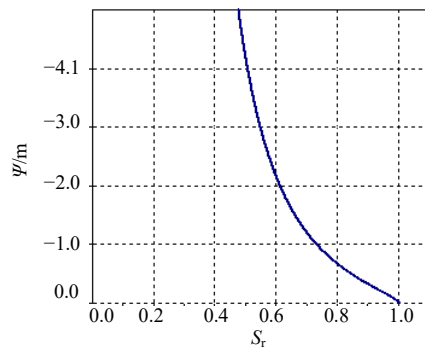


图 3 老虎岭遗址粉质黏土颗粒级配曲线

Fig. 3 Grading curve of the silty clay in Laohuling site



(a)



(b)

图 4 老虎岭遗址粉质黏土渗透性函数和土-水特征曲线

Fig. 4 Permeability function and soil-water characteristic curve of the silty clay in Laohuling site

2.4 分析工况

本文搜集了良渚古城遗址区的降雨历史数据、2019年全年的监测数据，并进行了统计分析，制定了8种不同工况开展数值模拟分析，见表3。其中天然状态为降雨入渗前，干燥工况即假定土体无基质吸力，小雨、中雨、大雨、暴雨、“利奇马”台风工况均使用了2019年场地的实际降雨监测数据。

2.5 计算结果

在 PLAXIS 3D 软件中开展了降雨入渗前、干燥状态和降雨入渗后的不同工况条件下边坡的稳定性数值模拟分析，图5、6、7分别显示了不同工况下边坡基质吸力及边坡稳定性变化情况。

表3 分析工况表

Table 3 Condition of calculation

序号	工况	降雨参数
1	天然	—
2	小雨	3.26 mm/d, 持续 28 d
3	中雨	25 mm/d, 持续 1 d
4	大雨	50 mm/d, 持续 1 d
5	暴雨	33 mm/h, 持续 19 h
6	统计最大日降雨量 (1981—2010)	611 mm/d, 持续 1 d
7	2019 “利奇马” 台风	290 mm/d, 持续 1 d
8	干燥状态	—

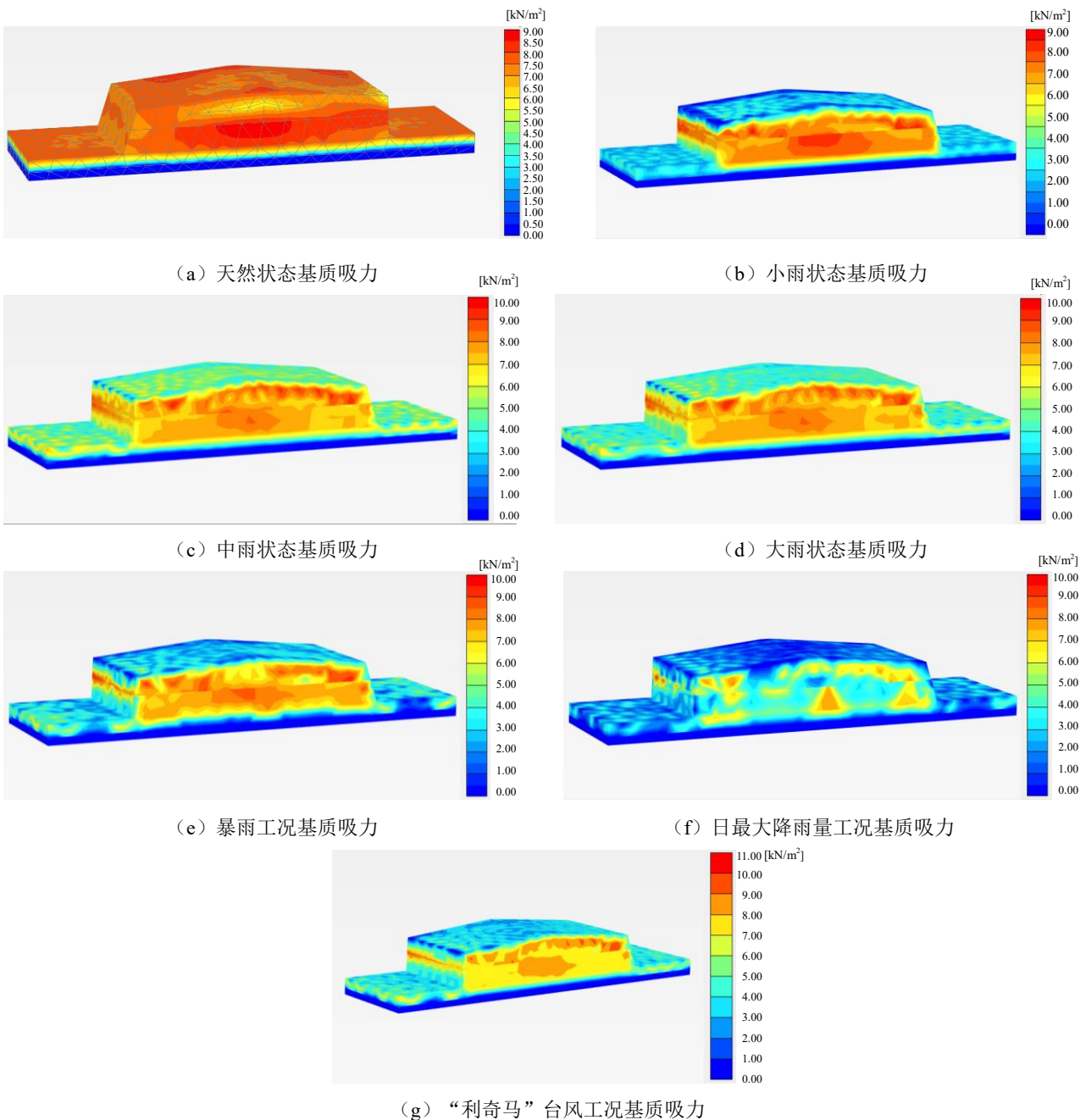


图5 不同工况下基质吸力分布

Fig. 5 Distribution of matric suction of different rainfall conditions

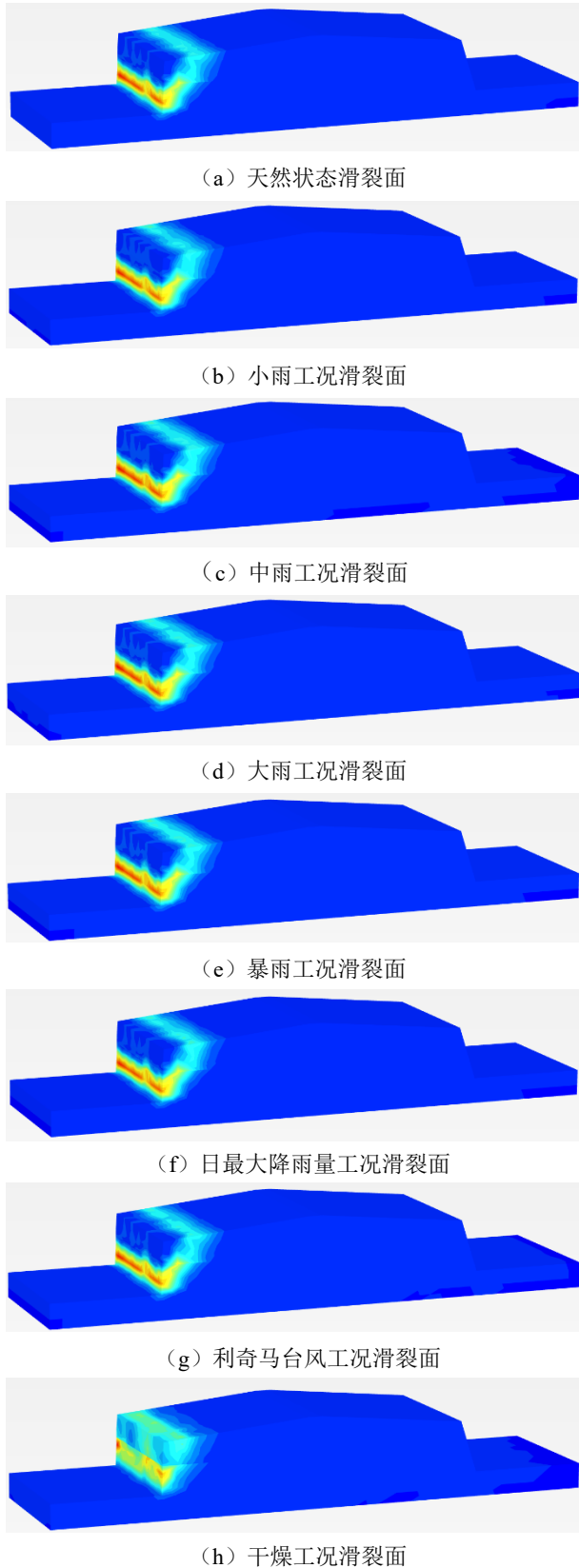


图 6 不同工况下边坡稳定性数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of slope stability of different conditions

2.6 计算结果分析

(1) 当边坡处于天然非饱和状态(工况 1)时,

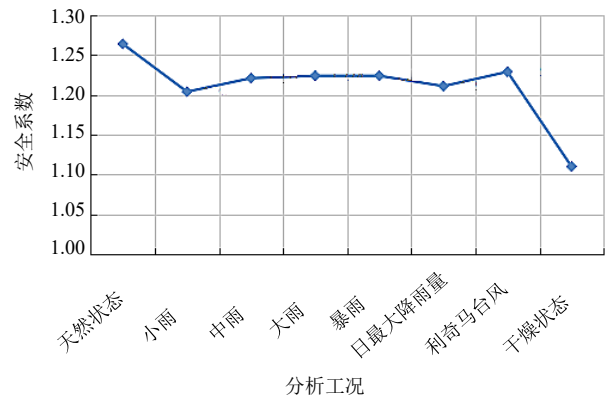


图 7 不同工况下边坡稳定性安全系数

Fig. 7 Safety factor of slope stability of different conditions

边坡稳定性系数较高, 边坡稳定。

(2) 当边坡处于干燥状态(工况 8)时, 安全系数最低。这是由于计算中的干燥工况假定土体无基质吸力, 因此边坡的安全系数会大幅降低, 证明基质吸力对边坡稳定性影响较大。

(3) 降雨入渗会导致该边坡安全系数减小, 降低值处于 1.0%~4.7%之间(该变化幅度值基本上处于坝坡抗滑安全系数工程等级降低一个工程等级范围)。随着雨水入渗, 坡体中土的含水量会自上而下逐渐增加, 随着饱和度的提高, 土的基质吸力下降、有效应力减小, 强度降低, 因此边坡的安全系数会降低。

(4) 各种降雨工况中小雨工况(工况 2)下边坡安全系数降幅最大, 为 8.7%。这是由于降雨速率和降雨持续时间影响边坡安全系数降低速率。在小雨工况下, 降雨速率慢、时间长, 雨水有充足的时间下渗至更深处, 浅层滑移面经过处土的强度降幅小。除小雨工况之外的中雨至暴雨、日最大降雨、利奇马台风工况下, 雨水大部分通过地表径流流失, 少部分雨水入渗, 且主要集中在土坡上部, 浅层滑移面经过处土的强度降幅大, 更容易发生浅层滑坡及雨水接触冲刷导致土层中颗粒流失。

(5) 我国长江中下游地区每年 6—7 月会有梅雨季节, 杭州也不例外, 在梅雨季, 土遗址会遭遇间隙性中-大-强降雨, 是遗址巡查和保护的重点时间段。本文的边坡稳定性数值模拟依据的是 2019 年统计的实际雨量数据, 计算结果显示在梅雨季土遗址能够保持整体稳定性。但对坡脚浸润面积的观察显示, 6—9 月浸润面积长期处于高值, 长此以往, 坡脚土体的力学性质将降低, 边坡整体稳定性也将随之降低。

3 结 论

(1) 非饱和状态下处于稳定状态的土质边坡遇到降雨时由于基质吸力的降低、渗流力的增大导致安全系数逐渐降低, 可能导致边坡的失稳。本文采用了考虑基质吸力影响的边坡安全系数计算方法对良渚古城老虎岭遗址发掘剖面开展了边坡稳定性数值模拟分析。为了使计算结果更能应用于实践, 对研究场地的历史降雨数据进行了搜集统计, 分别设计了8种不同工况进行了计算分析, 其中小雨、中雨、大雨、暴雨、“利奇马”台风工况均使用了2019年场地的实际降雨监测数据。结果显示, 天然状态下, 边坡的稳定性系数较高; 小雨工况(3.26 mm/d, 持续28 d)下伴随降雨过程边坡逐渐饱水, 安全系数降低幅度较大; 干燥状态下边坡无基质吸力, 安全系数最低。

(2) 数值模拟分析结果显示了边坡危险滑裂面的具体位置, 可作为遗址日常监测管理的重点巡查点位, 或者在危险滑裂面处安装裂缝计等自动监测设备, 掌握裂缝进展情况, 及时采取处置措施。尤其是在梅雨季和夏季暴雨频发期, 应加强动态管理, 关注新增裂缝以及已有裂缝的发展情况。

(3) 根据数值模拟分析结果对遗址边坡的保护工程提出如下建议: 保护工程应做好边坡的排水设施, 满足坡面水尤其是降雨和地下水等的排放要求, 形成良好的雨水、用水导引排出措施, 避免雨水、地下水冲刷造成滑塌、淤积等不良后果。特别应加强对坡脚的保护, 避免雨水、地下水浸泡坡脚, 导致强度降低, 而引起边坡失稳。场地有条件时应对整个场地设置永久性排水措施。

致谢:

本文受浙江省文物保护科技项目(2021021)及杭州良渚古城遗址世界遗产监测管理中心资助完成。

参考文献

[1] LIU L, CHEN X C. The Archaeology of China: From the late paleolithic to the early bronze age (Cambridge world archaeology)[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

[2] HOUBEN H, GUILLAUD H. Earth Construction: A comprehensive guide[M]. London: Intermediate

Technology Publication, 1994.

- [3] 王旭东. 潮湿环境土遗址保护理念探索与保护技术展望[J]. 敦煌研究, 2013(1): 1-6.
- WANG Xu-dong. Exploration of conservation philosophy for earthen sites in humid environments and an outlook on future conservation technology[J]. Dunhuang Research, 2013(1): 1-6.
- [4] 徐燕祎, 王思嘉, 张秉坚, 等. 遗址博物馆土遗址病害调查与成因分析——以萧山跨湖桥遗址博物馆为例[J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(1): 53-62.
- XU Yan-yi, WANG Si-jia, ZHANG Bing-jian, et al. Investigation and research on relics diseases of the earthen site of Kuahuqiao site museum[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2018, 30(1): 53-62.
- [5] SCHULZ W H, SMITH J B, WANG G H, et al. Clayey landslide initiation and acceleration strongly modulated by soil swelling[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45: 1888-1896.
- [6] 武发思, 汪万福, 贺东鹏, 等. 良渚北城墙考古土遗址表面藻类的分析研究[J]. 敦煌研究, 2014(4): 114-120.
- WU Fa-si, WANG Wan-fu, HE Dong-peng, et al. Analysis of algae growing on the surface of the north city wall of Liangzhu site[J]. Dunhuang Research, 2014(4): 114-120.
- [7] PAN C G, CHEN K Y, CHEN D T, et al. Research progress on in-situ protection status and technology of earthen sites in moisty environment[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119-219.
- [8] 王有为, 李国庆. 潮湿环境下的土遗址加固保护材料筛选试验研究——以福建昙石山遗址为例[J]. 文物保护与考古科学, 2014, 26(1): 8-21.
- WANG You-wei, LI Guo-qing. Experimental study on the selection of materials for reinforcement and protection of earthen archaeological sites in humid environments——on the Fujian Tanshishan site[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2014, 26(1): 8-21.
- [9] LI M, ZHANG H Y. Hydrophobicity and carbonation treatment of earthen monuments in humid weather condition[J]. Science China-Technological Sciences, 2012, 55(8): 2313-2320.
- [10] 刘佑荣, 陈中行, 周丽珍. 中国南方大型古遗址主要环境地质病害及其防治对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3795-3800.
- LIU You-rong, CHEN Zhong-xing, ZHOU Li-zhen. Research on prevention countermeasure and main geoenvironmental cause of large-scale ancient sites in

- south China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S2): 3795–3800.
- [11] 贾付春. 中原地区潮湿土遗址保护理念探索与对策研究——以河南内黄三杨庄还带聚落遗址为例[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- JIA Fu-chun. Exploration and research of typical humid sites conservation in central plains region of China: A case study of Sanyangzhuang han dynasty site in Henan province[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [12] 张秉坚, 周环, 王旭东. 潮湿环境的定量判别初探——以杭州良渚遗址为例[J]. *敦煌研究*, 2010(6): 104–109.
- ZHANG Bing-jian, ZHOU Huan, WANG Xu-dong. Quantitative discrimination of humid environment: A case study of Hangzhou Liangzhu site[J]. *Dunhuang Research*, 2010(6): 104–109.
- [13] CHEN W W, DAI P F, ZHANG J K, et al. Stability monitoring and evaluation of the modeled test square for prehistoric earthen sites during excavation period[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2016, 32(4): 464–471.
- [14] DE REU J, DE SMEDT P, HERREMANS D, et al. On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2014, 41: 251–262.
- [15] TORRES J A, HERMANDEZ-LOPEZ D, GONZALEZ-AGUILERA D, et al. A hybrid measurement approach for archaeological site modelling and monitoring: The case study of Mas D'Is, Penàguila[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2014, 50: 475–483.
- [16] 孔郁斐, 周梦, 宋二祥, 等. 利用 PLAXIS 软件计算考虑降雨的边坡稳定性[J]. *水利水运工程学报*, 2014(3): 70–76.
- KONG Yu-fei, ZHOU Meng, SONG Er-xiang, et al. Slope stability analysis in consideration of rainfall influence based on PLAXIS software[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2014(3): 70–76.
- [17] 李兆平, 张弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(5): 57–61.
- LI Zhao-ping, ZHANG Mi. Effects of rain infiltration on transient safety of unsaturated soil slope[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(5): 57–61.
- [18] 黄润秋, 戚国庆. 非饱和渗流基质吸力对边坡稳定性的影响[J]. *工程地质学报*, 2002, 10(4): 343–348.
- HUANG Run-qi, QI Guo-qing. The effect of unsaturated soil suction on slope stability[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(4): 343–348.
- [19] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHI D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33: 379–392.