不同掏蚀深度下古城墙的稳定性数值分析。

张明泉¹,马可婧¹,刘 灿²,王旭东³,薛丽洋¹,张 琳¹, (1.兰州大学资源与环境学院,甘肃兰州 730000; 2.兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃兰州 730000; 3.敦煌研究院,甘肃敦煌 736200)

摘 要:以浙江良渚古城的宽顶古场面墙稳定性问题为研究对象,本文针对古城墙可能出现的不同 深度的风沙掏蚀的实际工况,通过有限差分软件 FLAC3D,建立计算模型进行了稳定性分析,探讨 了不同掏蚀深度下城墙破坏机理和规律。研究表明:当城墙墙根掏蚀深度不是很大时,城墙整体稳 定,土体开始出现比较小的位移量,掏蚀部位及其周围出现局部塑性破坏现象。随着掏蚀深度的增 加,城墙塑性破坏区域不断向城墙体内部、顶部及顶部后缘范围发展,城墙上的土体位移量随着掏 蚀深度的增加而呈数量级的增加,直至城墙出现整体崩塌破坏。掏蚀作用加剧了地震作用下城墙 体的破坏,在掏蚀部位形成潜在破坏口,内部形成塑性贯通区,造成墙体整体崩塌。

关键词:古城墙;掏蚀;稳定性;地震作用;数值模拟;破坏机理

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2013)01-0133-06 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0133

Analysis and Numerical Calculations of Stability on Ancient City Wall under Various Sapping Depths

ZHANG Ming-quan¹, MA Ke-jing¹, LIU Can², Xue Li-yang¹, ZHANG Lin¹, Wang Xu-dong³
(1. School of Resources and Environmental Sciences, Lanzhou Unviersity, Lanzhou, Gansu 730000, China;
2. School of civil Engineering and Mechanics, Lanzhou Unviersity, Lanzhou, Gansu 730000, China;
3. Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu 736200, China)

Abstract: The width of the top of the ancient city wall in Liangzhu, which is known as the first city in China, reaches $40 \sim 60$ m; stability issues for this wall have been identified. Finite differences determined through FLAC3D software were considered to build a calculation model for examining failure laws and the mechanism of the ancient city wall under various sapping depths. The results show that when the sapping depth is not sufficiently large, the entire city wall is stable, and local plastic failure occurs near the sapping location. When the depth of sapping increases, the plastic failure area becomes wider and deeper and can reach the top of the wall. In addition, the soil displacement increases until the entire wall slides. The sapping contributes to the damage of the wall, a potential slide opening appears in the sapping area, and a plastic area appears in the wall, which leads to sliding of the entire wall.

Key words: Ancient city wall; Sapping; Stability; Earthquake; Numerical calculation; Mechanism of failure

0 引言

良渚古城墙是目前中国所发现同时代古城中最

① 收稿日期:2012-03-20
 基金项目:国家科技支撑计划项目(2010BAK67B16)
 作者简介:张明泉,(1979-)男(汉族),博士.E-mail:mqzhang@lzu.edu.cn.
 通讯作者:马可婧(1987-),女(汉族),甘肃通渭人,硕士研究生,主要研究方向为水资源与环境保护.E-mail:makj11@lzu.edu.cn

大的一座,称得上是"中华第一城"。对于这个 4000 年前的古城墙,大致以良渚遗址区内的莫角山遗址 (上世纪 90 年代初发现)为中心,东西长约 1 500~ 1700 m,南北长约1800~1900 m,略呈圆角长方 形。对其进行有组织的科学的保护必须建立在对其 科学认知的基础上,故对古城墙的稳定性分析是保 护前所必须进行的工作。由于古城墙的特殊性,做 到全面的监测和检测极其困难。近年来数值模拟分 析在古文物稳定性分析中的应用很好地解决了这类 问题[1-3]。王旭东等应用数值模拟分析了掏蚀古长 城在地震作用下的动力时程[4];杨国兴等应用数值 模拟软件研究了夯土类完整古城墙在地震作用下的 稳定性^[2];谢瑛等应用 ANSYS 软件分析了荥阳古 城墙的稳定性[5]。古城墙大部分是夯土堆积构筑 物,强度折减有限元法是分析土坡稳定性、确定土坡 最小安全系数的有效方法[6-9]。本研究采用有限差 分软件 FLAC3D 对良渚古城墙概化模型进行稳定 性数值分析。

1 城墙结构概况及有限元模型

城墙部分地段残高4m多,宽度达40~60m (我国现存最完整的古代城垣一一明朝洪武年间建 造的西安古城墙,底宽18m,顶宽15m),上面堆筑 黄土,夯实。

计算针对古城墙不同掏蚀深度工况,分别建立 数值模型并进行数值分析。采用概化模型:城墙底 座采用无夯实的黄土,城墙体采用夯实的黄土,由于 城墙顶部宽度达到 40~60 m 且为中心对称结构, 取城墙的一半进行研究。此城墙是由黄土夯实而 成,计算属于土质边坡的问题,边界精度应满足郑颖 人提出的数值模拟边界范围精度相同,即:城墙墙角 到左端边界距离为墙高的 1.5 倍即 6 m,城墙墙顶 到右端边界的距离为墙高的 2.5 倍即 10 m,上下边 界为墙高的 2 倍即 10 m^[10]。城墙数值模型尺寸如 图 1 所示。

古城墙体是由黄土夯实堆积而成,其在静力条件下破坏形式属于边坡稳定分析的范围。目前,静 力条件下边坡破坏有3个标志:以塑性区或者等效 塑性应变从坡脚到坡顶贯通作为边坡整体失稳的标 志;以土体滑移面上应变和位移发生突变为标志;以 有限元静力平衡计算不收敛作为边坡整体失稳的标 志^[11]。通过检测墙体剪应变增量变化、墙体塑性区 分布、监测点位移来研究墙体稳定性。古城墙地基 和墙体的黄土物理力学参数选用文献^[4]明长城山丹



图1 良渚古城墙数值模型尺寸

Fig. 1 The calculation model of the Liangzhu ancient city wall.

段黄土参数,如表1所示。

表1 古城墙黄土物理力学参数

 Table 1
 The Physcio-mechanical parameters of loess in ancient city wall

部位	密度 p/	弹性模量	泊松比 ν	黏聚力	内摩擦	抗拉强度
	[g • cm ³]	E/MPa		<i>c</i> / k Pa	角 φ/°	$\sigma_{ m b}/{ m kPa}$
城墙地基	1426	97.12	0.30	25	22.7	1.0
城墙墙体	1687	115.35	0.30	27	19	5.0

2 掏蚀作用

墙体根基掏蚀作用是指土遗址在风、雨、水、盐 类活动等单独或组合作用下墙基不断掏蚀凹进的过 程。会导致墙体稳定性降低,进而引起墙体局部坍 塌。其中风力掏蚀迫害是夯土古城墙基础破坏的主 要营力。王旭东等研究发现在风的作用下墙体底面 以上2m以内的薄弱部位会形成掏蚀坑、掏蚀槽或 掏蚀洞,甚至遗址墙体被穿透^[4]。

针对掏蚀严重性的不同,对不同掏蚀深度的墙体进行数值计算,并分别计算其安全系数。分别计 算掏蚀深度为0m、0.5m、0.8m,1m情况下墙体 的稳定性,令其掏蚀高度与深度相等。本构关系采 用摩尔一库伦本构模型,经有限元强度折减法计算 城墙在自重作用下的安全系数,其不同工况下的安 全系数如表2所示。此城墙属于土建筑物遗址,安 全系数定为1.50。

表 2 不同掏蚀深度下墙体安全系数

 Table 2
 The safety factors of wall under different depths of sapping

 不同工况	静力安全系数	 稳定状态
无掏蚀(掏蚀0m)	2.33	稳定
掏蚀 0.5 m	1.64	稳定
掏蚀 0.8 m	1.37	不稳定
掏蚀 1.0 m	1.28	不稳定

表 2 显示古城墙稳定安全系数随着掏蚀深度的 增加而减小。

第1期

通过研究不同掏蚀深度下剪应变增量云图分析 墙体内部剪应变随着掏蚀深度增加的变化。如图 2 所示,随着掏蚀深度的增加,剪应变增量变化范围增 大:在无掏蚀工况下最大剪应变增量为 9.2×10⁻⁷; 0.5 m 工况下增加到 6.1×10⁻⁵;掏蚀 1 m 时增加 到 9.5×10⁻⁵。无掏蚀工况下城墙所受剪应变集中 在掏蚀周围部位,表现为局部坍塌,对墙体整体稳定 性影响较小;在掏蚀深度达到 0.5 m 时所受剪应变 集中在掏蚀部位的上部,且剪应变明显增大;在掏蚀 深度达到 1 m 时可以明显的看出,掏蚀部位以上部 位出现剪应变变化,并有从掏蚀部位墙根发展到城 墙顶部,墙体可能会出现沿着剪应变变化集中区域 整体坍塌,顶部出现剪应变增大。

通过研究墙体内部塑性区随着掏蚀深度的变化 来研究墙体稳定性(图 3)。在无掏蚀工况下,墙体 墙根向内 0.5 m 深向上 0.5 m 高的范围内土体出 现了剪破坏;在掏蚀深度达到 0.5 m 时墙根向内 1. 5 m 内出现剪破坏,向上 1.5 m 范围内同时出现剪 破坏和拉破坏共同作用;在掏蚀达到 1 m 时,墙体 塑性区从墙根贯通至城墙顶部,剪破坏区域向墙体 内部发展,拉破坏区域向墙体上部和墙体顶部后缘 发展,拉破坏区域贯穿墙体,墙体出现整体崩塌,即 墙体整体失稳。





Fig. 2 The shear strain increment nephograms of the wall under different depths of sapping.



Fig. 3 Distributing graphs of plastic area in the wall under different depths of sapping.





再来研究城墙内监测点单元土体随着掏蚀深度 增加位移量的变化。墙体内监测点布置如图 4 所 示,监测点从墙根监测点 1 沿墙体向上到墙顶监测 点 9。在三种不同工况下,监测点水平和竖直向最 大位移如图 5 所示。

图 4 显示,随着掏蚀深度的增加各个监测点的 水平和竖直位移相应的增大。取监测点 5 为例,在 三种工况下的水平向位移分别为 8.473×10⁻⁶ mm、 5.102×10⁻³ mm、1.518×10⁻¹ mm,水平位移随着 掏蚀深度增加;竖直位移分别为 1.165×10⁻⁵ mm、 1.531×10⁻² mm、1.395×10⁻¹ mm,同样依次增大。







Fig. 6 Kobe seismic wave after adjustment.

通过以上研究得出,随着墙体掏蚀深度的增加 墙体剪应变增量逐渐增加,墙体土体位移量逐渐增 加。墙根掏蚀部位先出现局部土体剪切破坏,随着 掏蚀深度的增加掏蚀部位上部出现处于拉破坏的土 体,并处于剪切破坏和张拉破坏的土体范围向城墙 顶部和顶部后缘发展,城墙整体稳定性不断减小,在 达到一定掏蚀深度时墙体出现整体崩塌现象。此现 象与平遥古城南门翁成的破坏形式相同^[12],验证了 此数值计算的可靠性。

3 地震作用下掏蚀城墙体稳定性

为了探讨地震作用下掏蚀古城墙的稳定

性^[13-14],将 Kobe 地震波输入模型底部。Kobe 地震 波为 1995 年日本发生阪神地震时记录的真实地震 波,本研究将 Kobe 地震波进行缩小并进行了过滤 和基线校正,调整后的波形如图 6 所示。地震波最 大加速度为 1.453 m/s²,相当于发生 7.5 级地震时 最大峰值加速度。在动力分析中,模型边界处理是 一个关键问题,因为边界上会存在波的反射,对动力 分析的结果产生影响。FLAC3D 在动力分析中提 供了静态边界(黏性边界)和自由边界。此模型周围 采用自由边界条件。

将地震波分别输入无掏蚀、掏蚀 0.5 m、掏蚀 1 m 情况下的古城墙模型底部,地震持时为 22 s,各个

第 35 卷

第1期

张明泉等:不同掏蚀深度下古城墙的稳定性数值分析

墙体的剪应变增量变化图和塑性区分布图如图 7、8 所示。分析图 7 和图 8,在无掏蚀的城墙上剪应变 增量变化和塑性区破坏集中在墙脚位置;在掏蚀 0. 5 m 和掏蚀 1 m 的城墙中土体滑动面塑性区贯通, 并形成潜在破坏面,结构出现宏观显性破坏^[15],此 时城墙可能发生了沿潜在破坏面的整体拉破坏。通 过对比静力条件下的城墙体剪应变增量云图(图 2),得出:完整的城墙体在此地震作用下是整体稳 定,当城墙出现掏蚀时,城墙相对于静力条件下形成 上下贯通的潜在破坏面,造成城墙整体失稳。地震 作用下掏蚀作用城墙的危害明显强于静力条件下, 并且在掏蚀部位容易形成潜在拉破坏口,并使塑性 区上下贯通,造成城墙整体失稳,掏蚀作用下的城墙 体的抗震能力显著小于完整城墙体。

4 结论

(1)古城墙墙脚处掏蚀现象降低了墙体整体的 稳定性,安全系数随着掏蚀深度的增加而减小。 (2)当宽顶古城墙墙脚出现掏蚀现象并且掏蚀 深度未达到一定深度时,城墙体整体稳定,在掏蚀局 部形成剪应变增量局部增大现象,墙体土体开始出 现位移增大现象,墙脚掏蚀部位出现塑性破坏区域, 但塑性破坏区域局限于掏蚀部位及其周边区域,没 有形成贯通。

(3)当宽顶古城墙墙脚掏蚀深度达到一定深度后,墙体稳定性出现明显下降,安全系数明显减小, 在掏蚀局部形成剪应变增量局部急剧增大并发展到 城墙顶部,墙体土体位移量出现增大一个数量级的 增大,墙体塑性区从掏蚀局部区域发展到城墙顶部 并向墙顶部后缘发展,塑性区形成贯通后,墙体出现 整体破坏。

(4) 地震作用下掏蚀城墙体容易在掏蚀部位形 成潜在破坏口,并且城墙体形成明显的贯通塑性区, 消弱城墙体的抗震性能。





Fig. 7 The shear strain increment nephograms of the wall with different sapping depths under earthquake.

[参考文献]

- [1] 张立乾, 葛川. 数值仿真技术在古建筑稳定性评价中的应用
 [J]. 特种结构, 2009, 26(4): 115-120.
 ZhANG Li-qian, GE Chuan. The Application of Numerical
 - Simulation Technology in Stability Evaluation to Ancient Architecture[J]. Special Structures, 2009, 26(4):115-120.
- [2] 杨国兴,张立乾,孙崇华,等. 夯土类平遥古城墙稳定性分析 与评价研究[J]. 特种结构, 2010, 27(4); 102-107. YANG Guo-xing, ZHANG Li-qian, SUN Chong-hua, et al. Stability Analysis and Evaluation about the Old Rampart Builded with Tamped Soil in Pingyao [J]. Special Structures, 2010, 27(4):102-107.
- [3] 张柯, 吴敏哲, 孟昭博, 等. 考虑接触非线性的西安明城墙稳 定分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2913-2918.
 ZHANG Ke, WU Ming-zhe, MENG Zhao-bo, et al. Stability analysis of Xi'an city wall considering nonlinear contact[J].
 Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9):2913-2918.
- [4] 王旭东,石玉成,刘琨. 夯土长城墙体掏蚀失稳机理研究[J]. 西北地震学报,2011,33(增刊): 381-385.

WANG Xu-dong, SHI Yu-cheng, LIU Kun. Research on Sapping Instability Mechanism for Rammed Wall[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Supp.):381-385.

 [5] 谢瑛,陈书丽, 巩立亮. 荥阳古城墙稳定性数值分析研究[J]. 山西建筑, 2008, 34(30): 89-90.
 XIE Ying, CHEN Shu-li, GONG Li-liang. The stability of nu-

merical analysis about ancient city wall in XingYang [J]. SHANXI Anchitecture, 2008, 34(30):89-90.

- [6] 迟世春,关立军.应用强度折减有限元法分析土坡稳定的适应性[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(9):1298-1302. CHI Shi-chun, GUAN Li-jun. Soil constitutive relation for slope stability by finite element method with the discount shear strength technology[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005,37(9):1298-1302.
- [7] 郑宏,田斌,刘德富,等.关于有限元边坡稳定性分析中安全 系数的定义问题[J].岩石力学与工程学报,2005,24(13): 2225-2230.

ZHENG Hong, TIAN Bin, LIU De-fu, et al. On definitions of safety factor of slope stability analysis with finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineer-



图8 地震下不同掏蚀深度下墙体塑性区分布图

Fig. 8 The distributing graphs of plastic area in the wall with different sapping depths under earthquake.

ing, 2005,24(13):2225-2230.

- [8] 吕庆,孙红月,尚岳全.强度折减有限元法中边坡失稳判据的研究[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(1):83-87. Lü Qing, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan. Slope failure criteria of shear strength reduction finite element method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2008,42 (1):83-87.
- [9] 魏汝龙,张凌. 稳定分析中的强度指标问题[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(5): 24-30.

WEI Ru-long, ZHANG Ling. Strength paraments in stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993,15(5):24-30.

- [10] 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝.用有限元强度折减法进行边坡稳 定分析[J].中国工程科学,2002,4(10);57-62.
 ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, ZHANG Lu-yu. Slope stability analysis by strength reduction FEM[J]. Engineering Science,2002,4(10);57-62.
- [11] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳.极限分析有限元法讲座──Ⅱ有 限元强度折减法中边坡失稳的判断探讨[J].岩土力学, 2005,26(2);332-336.

ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2); 332-336. [12] 张文革,席向东、平遥古城墙的稳定性分析[J]. 建筑结构, 2009,39(3);110-112.

ZHANG Wen-ge, XI Xiang-dong. Analysis and numerical calculations of stability on Pingyao ancient city wall[J]. Journal of Building Structures, 2009, 39(3):110-112.

- [13] 孔德刚,赵成江,程晓伟,等. 地震遗址加固方法的探讨
 [J].西北地震学报,2011,33(增);352-356.
 KONG De-gang, ZHAO Cheng-jiang, CHENG Xiao-wei, et al. Discussion on Earthquake Ruins Reinforcement Method
 [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011,33(Suppl.); 352-356.
- [14] 杨庆华,姚令侃,邱燕玲,等. 高烈度地震区岩土体边坡崩 塌动力学特性研究[J]. 西北地震学报,2011,33(1);34-61. YANG Qing-hua, YAO Ling-kan, QIU Yan-ling, et al. Research on Dynamical Characteristics of Collapse of Rock and Soil Slope in High Seismic Intensity Areas[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011,33(1); 34-61.
- [15] 梁庆国,韩文峰. 强震区岩体地震动力破坏特征[J]. 西北地 震学报, 2009, 31(1): 15-20.
 LINAG Qing-guo, LIU Gui-ying. Characteristics of Rock Mass Failue under Seismic Loads at Strong Earthquake Areas

Mass Failue under Seismic Loads at Strong Earthquake Areas [J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(1):15-20.

138

第 35 卷