

汉阳陵K21号外藏坑裂隙调查及稳定性研究

秦立科, 王琦, 段晓彤, 郭斌, 庞磊, 白延

Investigation and stability analysis of cracks of the K21 external pit fissures in the Hanyang Mausoleum

QIN Like, WANG Qi, DUAN Xiaotong, GUO Bin, PANG Lei, and BAI Yan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

精细地形下的尾矿坝稳定性及溃坝模拟分析

Combined simulation analysis of the tailings dam stability and dam break under fine terrain

孙鸿昌, 郝杨青潮 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 136-144

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

土工格室加筋垫层路堤破坏模式和稳定性评价

Failure mode and stability evaluation of geocell-reinforced cushion embankment

金家庆, 徐超, 梁程, 刘若桐 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 86-86

川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价

Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan-Tibet Railway

周洪福, 冯治国, 石胜伟, 王保弟, 徐如阁, 冉涛 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 112-119

深厚软土地区基坑墙底抗隆起稳定性Prandtl计算式的讨论

A discussion of the Prandtl calculation formula for anti-uplift stability of the bottom of a foundation pit wall in deep soft soil areas

阳吉宝 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 61-69

电镀场地重金属铬污染土固化率及稳定性研究

A study of the curing rate and stability of heavy metal chromium contaminated soil at electroplating sites

王露艳, 刘干斌, 周晔, 陈航, 陈斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 183-189



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210024

秦立科, 王琦, 段晓彤, 等. 汉阳陵 K21 号外藏坑裂隙调查及稳定性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 137-146.

QIN Like, WANG Qi, DUAN Xiaotong, *et al.* Investigation and stability analysis of cracks of the K21 external pit fissures in the Hanyang Mausoleum[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 137-146.

汉阳陵 K21 号外藏坑裂隙调查及稳定性研究

秦立科^{1,2}, 王琦^{1,2}, 段晓彤³, 郭斌^{1,2}, 庞磊⁴, 白延⁴

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学岩土文物与遗迹保护研究所, 陕西 西安 710054; 3. 汉景帝阳陵博物院, 陕西 西安 712038; 4. 西北有色勘测工程公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 汉阳陵博物馆位于陕西省咸阳市, 是我国也是全世界首座全封闭地下博物馆, 其外藏坑的裂隙病害发育, 严重危及坑壁和坑底文物安全, 迫切需要保护和加固。以往对露天和半封闭环境下遗址病害及防治研究居多, 而对全封闭环境下的研究鲜有报道。以汉阳陵 K21 号外藏坑为研究对象, 首先通过现场调查确定裂隙数量和分布特征, 在此基础上研究裂隙产生的原因并进行分类, 通过数值模拟方法对坑壁稳定性及影响因素进行分析。研究结果表明: K21 号外藏坑共 53 条裂隙, 主要分布于南、北侧地表和坑壁, 地表纵向裂隙为卸荷裂隙, 地表横向裂隙为干缩裂隙, 坑壁裂隙主要为构造裂隙; 纵向卸荷裂隙是坑壁稳定性降低的主要原因, 无论是地震、人为荷载还是裂隙进一步发育都将导致坑壁发生失稳。建议采用锚杆对坑壁进行加固, 通过施加预应力对卸荷裂隙进行复位和预紧。该研究对馆藏遗址裂隙病害调查与保护具有重要的指导意义。

关键词: 汉阳陵; 外藏坑; 卸荷; 干缩开裂; 稳定性

中图分类号: K854.1; K878.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0137-10

Investigation and stability analysis of cracks of the K21 external pit fissures in the Hanyang Mausoleum

QIN Like^{1,2}, WANG Qi^{1,2}, DUAN Xiaotong³, GUO Bin^{1,2}, PANG Lei⁴, BAI Yan⁴

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Institute of Geotechnical Relics and Relics Protection, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Han Yangling Museum, Xi'an, Shaanxi 712038, China; 4. Northwest Nonferrous Survey Engineering Company, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Located in the city of Xianyang in Shaanxi Province, the Hanyang Mausoleum is the first fully closed underground museum in China and in the world. The fissure disease of its outer pit is developing, which seriously endangers the safety of the pit wall and the pit bottom cultural relics, and it is urgent to protect and strengthen the pit. In the past, more was learned about the disease and prevention of the ruins in the open air and semi-closed environment, while the completely closed environment was seldom examined. This paper takes the outer pit K21 of the Hanyang Mausoleum as the research object. The number and distribution characteristics of cracks are determined through field investigation. On this basis, the causes of cracks are studied and classified. The stability

收稿日期: 2022-10-12; 修订日期: 2023-03-14

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071100); 国家文物局重点科研基地开放课题(ZK2016001)

第一作者: 秦立科(1982-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土文物保护研究及教学工作。E-mail: 422576294@qq.com

of pit wall and its influencing factors are analyzed by numerical simulation methods. The research results show that there are 53 cracks in the K21 outer pit, mainly occurring on the south and north sides of the surface and the pit wall. The surface longitudinal cracks are unloading cracks, the surface transverse cracks are dry shrinkage cracks, and the pit wall cracks are mainly structural cracks. The longitudinal unloading crack is the main reason for the reduction of pit wall stability. The earthquake, artificial load or the further development of cracks will lead to the pit wall to be unstable. It is recommended to use anchor bolts to reinforce the pit wall, and reset and pre-tighten the unloading cracks by applying prestress. This study is of important guiding significance for the investigation and protection of the fissure disease in the museum sites.

Keywords: Hanyang Mausoleum; outer storage pit; unload the load; dry shrinkage cracking; stability

我国具有悠久的历史 and 璀璨的文明,留下了数量众多分布极广的地下遗址。地下遗址包括陵寝、墓葬及埋藏于地下的聚落、城址等,是人类文明的见证和智慧的结晶。随着科技和经济的发展,越来越多的地下遗址被发现、发掘、研究和展示。地下遗址发掘后,如长期暴露在自然环境中,将出现表层粉化、泛碱、变形、开裂、灭失等一些列病害^[1]。鉴于此,对一般遗址往往进行回填保护,对重要遗址主要采取建造遗址博物馆进行保护并展示。遗址博物馆位于遗址上方,形成半封闭或全封闭空间,不仅能保护遗址而且能很好地向公众展示其价值,在世界各地得到了广泛应用^[2]。国外的如希腊卫城博物馆、法国克吕尼博物馆、匈牙利阿昆库姆博物馆等,我国遗址博物馆发展迅速数量较多,目前已经建成秦始皇兵马俑博物馆、殷墟博物馆、汉阳陵博物馆等上百处^[3]。

遗址博物馆给遗址提供了较为稳定的外部环境,避免了光照、降雨等对遗址的直接影响,但由于应力变化及水分单向蒸发等原因,遗址泛碱、变形、开裂等病害依然严重^[4]。在遗址病害探测方面, Lercari 等^[5]运用三维激光扫描对土遗址病害进行了信息的采集、监测和评估。Fujii 等^[6]采用数字立体摄影技术对土遗址病害信息的分析,该技术可以记录土墙表面病害的形态。在病害机理研究方面,周鹏等^[7]对哈密的烽燧土遗址进行了现场勘察和室内试验分析,发现盐渍化、风蚀和雨蚀是烽燧土遗址病害形成的主要因素。王思嘉^[8]以杭州跨湖桥遗址为研究对象,对土遗址博物馆内的岩土体病害进行了调查研究,分析得出剧烈失水是导致土遗址病害的重要原因。以上研究主要针对开放或半封闭环境下的遗址。

汉阳陵是我国也是世界上第一座全封闭地下博物馆,主要用于保护和展示帝陵东侧的外藏坑^[9]。目前,外藏坑出现了大量纵横交错的裂隙^[10],如图 1 所

示,如果裂隙进一步发育或在其他因素扰动下,坑壁一旦发生大面积失稳坍塌,不仅影响外藏坑的完整性,还会严重危及坑底文物安全。



图 1 地表裂隙

Fig. 1 Surface plane crack

在汉阳陵外藏坑中,位于帝陵封土东侧最北端的 K21 号坑裂隙病害最为典型,裂隙不仅数量多而且较为发育。因此,以汉阳陵 K21 号外藏坑为研究对象,对其裂隙病害展开现场调查,分析裂隙成因,采用强度折减法研究坑壁的稳定性,最后提出加固方法建议。该项工作不仅为 K21 号外藏坑的保护提供科学依据,还为其他外藏坑及馆藏遗址的调查与保护工作提供借鉴。

1 汉阳陵概况

汉阳陵是西汉景帝刘启与王皇后的同茕异穴合葬陵园,位于陕西省咸阳市东部,是第五批全国重点文物保护单位。帝陵坐西向东,四周共有 81 条放射状外藏坑,包括东侧和北侧各 21 条、西侧 20 条、南侧 19 条,如图 2 所示。1999 年发掘了帝陵封土东侧的 K11—K21 号外藏坑,2006 年建成汉阳陵帝陵外藏坑保护展示厅。外藏坑保护展示厅是在 K12—K21 号外藏坑上构建而成的地下建筑,是我国第一座全封闭式地下遗址博物馆^[11-13]。

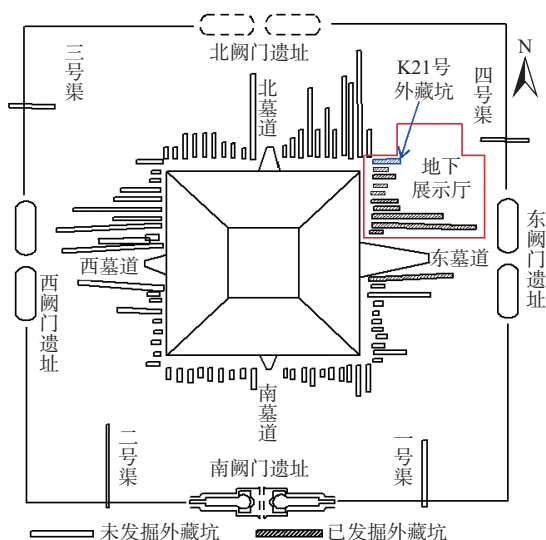


图2 汉阳陵平面图

Fig. 2 Plan of the Hanyang Mausoleum

汉阳陵外藏坑坑道长度为 5~100 m 不等, 宽约 3 m, 深约 2.7 m, 坑道间距约为 4 m。坑道内原为木结构组成的长方体空间, 存放有各类陪葬品, 如今木结构已经全部腐朽, 仅在坑壁土体上发现部分遗迹^[14]。

2 K21 号外藏坑裂隙调查

K21 号外藏坑呈东西走向, 形制为长方形, 坑道长约 19.3 m, 宽约 2.9 m, 深约 2.7 m。采用三维激光扫描技术对裂隙的位置、长度及宽度进行测绘, 通过高动态地质雷达对裂隙发育情况进行探测, 然后对裂隙进行描绘和统计。

2.1 裂隙分布

定义坑道长方向为纵向, 短方向为横向。外藏坑地表平面上沿纵向发育的裂隙为纵向裂隙, 沿横向发育的裂隙为横向裂隙; 坑道立面上沿竖直方向发育的裂隙为坑壁裂隙。K21 号外藏坑的裂隙分布状况描述如下。

2.1.1 北侧地表平面

北侧地表平面上共有 12 条裂隙, 其中纵向裂隙 5 条, 横向裂隙 7 条, 以纵向裂隙最为严重。裂隙 BZ1、BZ3、BZ4、BZ5 具有长而宽的特点, 割裂坑壁上的土体形成危险土块。最长的纵向裂隙为 BZ5, 长 9.8 m, 宽 9~13 mm; 裂隙 BZ3 的宽度最大, 宽 13~17 mm, 长 7.1 m。

2.1.2 南侧地表平面

南侧地表平面上共有 13 条裂隙, 其中纵向裂隙 5

条, 横向裂隙 8 条。纵向裂隙 TZ2 长度达到 11.3 m, 宽 9~12 mm, 为 K21 号外藏坑地表平面上最长的裂隙。南、北侧地表平面裂隙分布情况如图 3 所示。

2.1.3 东、西地表平面

东、西地表平面上不存在裂隙。

2.1.4 北立面

北立面共有 14 条裂隙(图 4)。坑壁竖向裂隙 NV1、NV8、NV10 上下贯通整个坑壁; NV10、NV12、NV14 处已发生小规模崩塌现象。北立面坑壁顶部向下发育的裂隙 NV1、NV5、NV9、NV10、NV12、NV13、NV14 与北侧地表横向裂隙 BZ1、BH2、BH3、BH4、BH5、BH6、BH7 一一对应。

2.1.5 南立面

南立面共有 13 条竖向裂隙(图 5)。竖向裂隙 SV1、SV3 长度为 2.4 m 和 2.5 m, 已接近贯通。SV12 为上下贯通的竖向裂隙, 其走势由顶部向下发展至 1.3 m 时转而向左下方延伸, 其长度为 2.7 m, 宽度 3~4 mm。南立面坑壁顶部向下发育的裂隙 SV1、SV2、SV3、SV4、SV7、SV10 与南侧地表横向裂隙 TZ5、TH8、TH5、TH4、TH7、TH10 一一对应。

2.1.6 东立面、西立面

东立面左侧存在一条 1.3 m 长、3 mm 宽的竖向裂隙 EV1; 西立面无裂隙产生。东、西立面裂隙分布情况如图 6 所示。

2.2 裂隙特征

根据现场的裂隙分布情况来看, K21 号外藏坑裂隙具有以下特征: (1)裂隙主要分布在南、北地表平面和南、北立面, 东、西地表平面上无裂隙; (2)外藏坑南、北侧地表纵向裂隙严重发育, 具有长且宽的特点; (3)南、北侧地表横向裂隙长度 0.5~3.2 m, 和纵向裂隙呈“十”字形相交, 部分与坑壁立面上的竖向裂隙具有对应关系; (4)坑壁立面上主要分布有竖向裂隙, 多始发于顶部, 向下延伸接近坑底; (5)北立面的裂隙已出现小规模崩塌。

3 裂隙成因分析

汉阳陵外藏坑属于第三系风积黄土, 具有一定的结构性, 裂隙产生及扩展因素主要有卸荷影响、干缩开裂和构造裂隙等。在多种因素综合作用下, 裂隙不断发育, 在坑壁上形成板柱状土体, 最终造成局部失稳破坏。

3.1 卸荷影响

众多学者^[15-20]对卸荷条件下裂隙岩土体的强度、

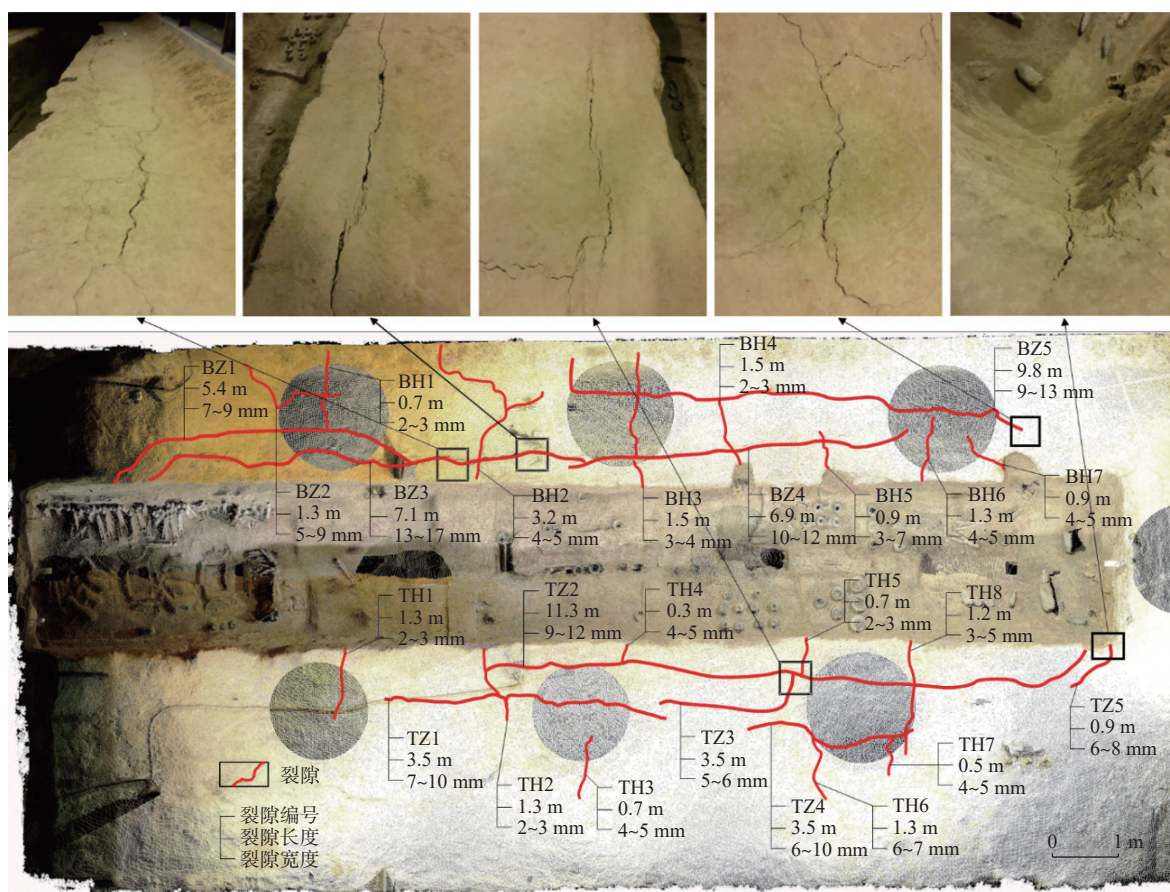


图 3 南、北侧地表平面裂隙分布图

Fig. 3 Fissures distribution in the south and north surface plane

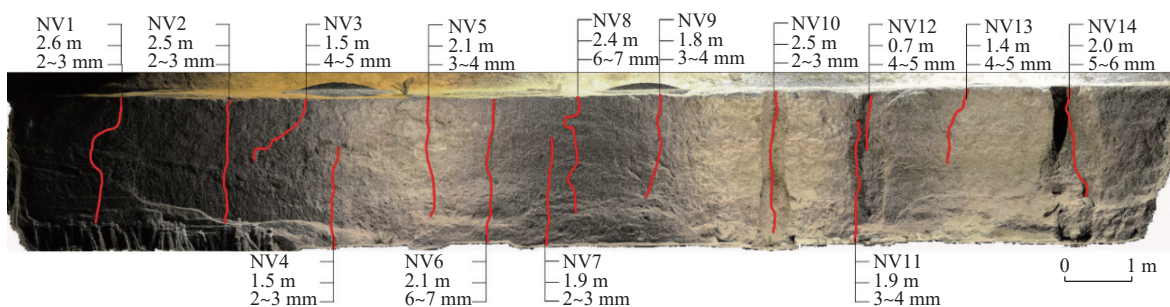


图 4 北立面裂隙分布图

Fig. 4 Distribution of fractures on the north facade

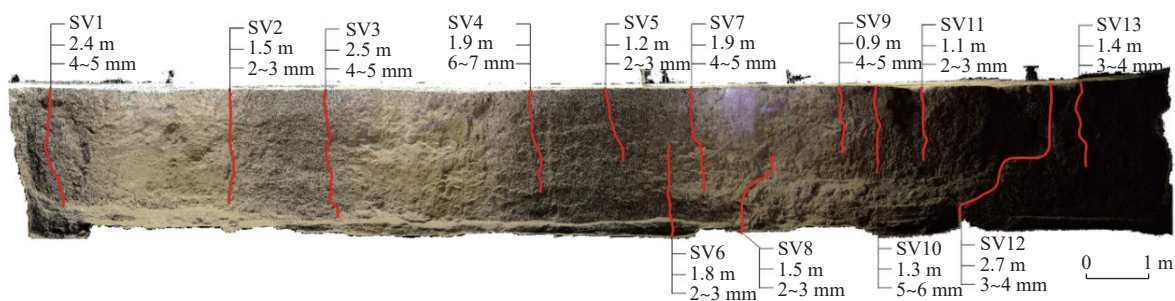
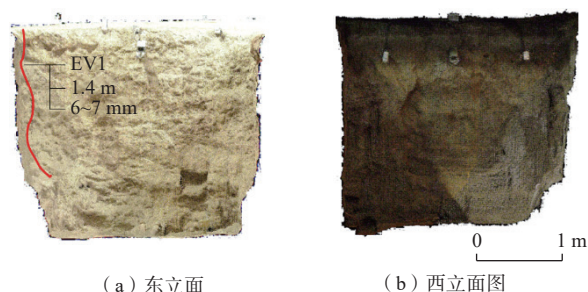


图 5 南立面裂隙分布图

Fig. 5 Distribution of fractures on the south facade



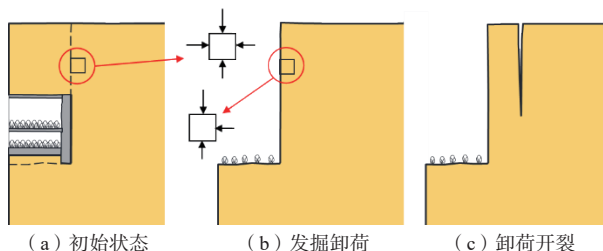
(a) 东立面 (b) 西立面图

图 6 东、西立面裂隙分布图

Fig. 6 Fracture distribution of the east and west facades

变形及破坏特征进行了研究,发现卸荷裂隙的扩展是在卸荷变形引起的裂隙面剪切力增大而抗剪力减小的综合作用下的破坏。

对于汉阳陵外藏坑来说,坑壁高度约为 2.7 m,卸荷产生裂隙的过程如图 7 所示。在汉代营建外藏坑时,坑内设有内支撑、侧枋木等结构支护措施^[14]。考古发掘将上部土体及糟朽的支护结构全部移除,形成近似垂直的边坡,打破了土体的原始平衡状态。坑壁土体一侧压力释放,土体由两侧受压转变为一侧受压、一侧自由,从而使土体向自由一侧变形。当土体垂直压力基本保持不变,侧向压力减少,其莫尔圆将不断扩大,如图 8 所示。当莫尔圆与剪切强度线相切时,达到土体的抗剪极限强度,卸荷裂隙开始产生。



(a) 初始状态 (b) 发掘卸荷 (c) 卸荷开裂

图 7 卸荷裂隙产生示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of the unloading crack

外藏坑呈长方形,在纵横向交界处,两侧土体相互支撑,互为约束。由于纵向长度约为横向长度的 6.7 倍,纵向坑壁所受约束范围有限,应力释放充分,所以卸荷裂隙主要分布于外藏坑南、北侧地表。而横向坑壁所受约束较强,应力释放不充分,故东、西侧地表没有卸荷裂隙产生。

3.2 干缩开裂

干缩裂隙普遍存在于各类土遗址表面^[21]。宋京雷等^[22]的研究表明内部水分大量流失即可引发干燥收缩现象,孙强等^[23]发现土体的失水率和表面裂隙的发育呈正相关关系,唐朝生等^[24]、卢全中等^[25]通过试

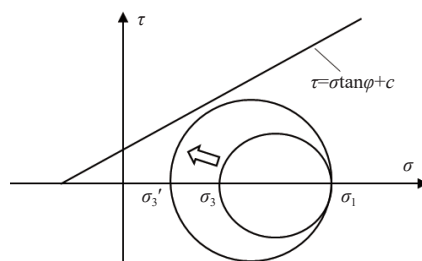


图 8 应力莫尔圆

Fig. 8 Mohr circle of stress

验研究得出:含水量降低使得土体产生不均匀的张拉应力场,当张拉应力超过了土体的抗拉强度时,就会造成土体干缩开裂,如图 9 所示。

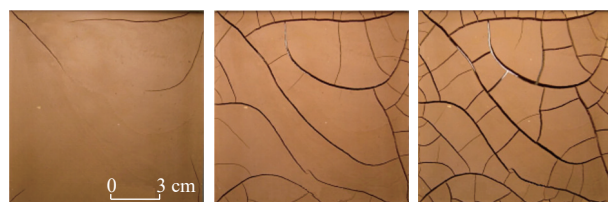


图 9 干缩开裂形成和发育过程 (据文献 [24])

Fig. 9 Formation and development of dry shrinkage cracking (adapted from Ref. [24])

汉阳陵外藏坑保护展示厅是全封闭式地下建筑,内部土体处于单向蒸发状态,其含水量持续减小,通过对坑内土体测试,目前外藏坑土体含水率为 2.35%,与普通风干土块的含水率处于同一水平。水分通过地表及坑壁蒸发,在应力集中处产生微小裂隙,裂隙尖端处会产生拉应力的集中,在尖端的引导下,裂隙在水平方向和竖直方向上扩展,不断加深变宽。

由于外藏坑纵向一侧临空且卸荷裂隙提供了新的蒸发面,干缩拉应力平行于坑道纵向,所以干缩裂隙的发育方向多为横向,与纵向卸荷裂隙呈“十”字形相交。

3.3 构造裂隙

垂直构造裂隙就是土体内部在地应力的作用下产生的裂隙,在黄土层中普遍发育,也是黄土的主要特征之一^[26]。外藏坑立面上的竖向裂隙大多属于构造裂隙,和干缩裂隙相比,其主要特征是裂隙宽度较小且上下宽度较为一致。外藏坑立面上的裂隙 NV4、NV7、NV12、SV6、SV8 等均属于此类裂隙。

综上所述可知,纵向裂隙为卸荷裂隙,而横向裂隙为干缩裂隙,坑壁裂隙主要为构造裂隙。如图 10 所示,纵向卸荷裂隙宽度最大,发育最为严重,将坑壁沿着纵向切割成板状土体。横向干缩裂隙和纵向裂

隙相交,进一步将板状土体切割成柱状土体。由于坑壁上的板柱状土体向坑内变形,其重心随之偏移,纵向卸荷裂隙将向临空一侧倾斜向下扩展(以下简称扩展裂隙)。当扩展裂隙发育至一定程度时,土体失稳崩塌。已发现的局部崩塌均为扩展裂隙发育所致。因此,影响外藏坑坑壁稳定性的主要裂隙为纵向卸荷裂隙。

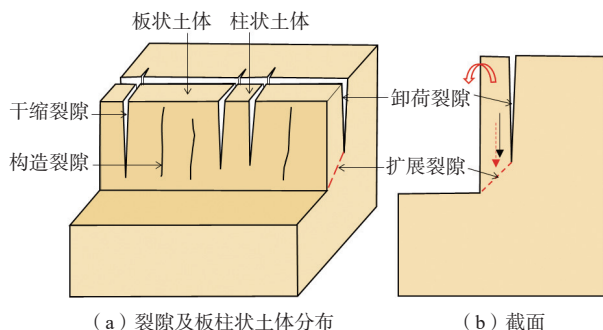


图 10 坑壁土体裂隙示意图

Fig. 10 Schematic diagram of pit wall soil cracking

4 稳定性分析

4.1 稳定性分析方法

采取强度折减法^[27]研究汉阳陵外藏坑坑壁裂隙对坑壁稳定性的影响和局部失稳破坏过程,该方法定义外荷载保持不变,不断折减边坡土体的抗剪强度参数(c 、 $\tan\varphi$),最终使边坡处于极限平衡状态,此时的折减系数即为相应的稳定性系数^[28],具体公式为:

$$c' = \frac{1}{F_s} c \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{1}{F_s} \tan\varphi\right) \quad (2)$$

式中: F_s ——稳定性系数;

c ——土体的黏聚力/kPa;

c' ——体折减后的黏聚力/kPa;

φ ——土体的内摩擦角/(°);

φ' ——土体折减后的内摩擦角/(°)。

根据《建筑边坡工程技术规范》^[29]规定:边坡稳定性状态分为稳定、基本稳定、欠稳定和欠稳定四种状态。稳定性状态划分如(表 1)。表中: F_{st} 为边坡稳定安全系数,考虑外藏坑的永久性及其文物价值,自然

表 1 边坡稳定性系数及稳定性状态

Table 1 Slope stability coefficient and stability state

稳定性系数	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < F_{st}$	$F_{st} \leq F_s$
稳定性状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

状态下取 1.35,地震及人为荷载作用下取 1.15;当稳定性系数小于 F_{st} 时应对边坡进行加固处理。

4.2 计算模型

采用离散元软件 UDEC 建立数值模型,土体材料设为理想弹塑性体,选用 Mohr-Coulomb 本构模型。当坑壁危险土体产生较大的位移和塑性应变时,危险土体由静止状态变为运动状态,则判定为坑壁失稳。

由于影响坑壁稳定性的主要裂隙为纵向卸荷裂隙,所以可将坑壁稳定性计算简化为二维平面应变问题。选取含有纵向卸荷裂隙的截面建立外藏坑计算模型,如图 11 所示。考虑外藏坑坑底以下 2 m 范围内的土体,坑壁高 2.7 m,模型总高度为 4.7 m;坑道底宽 2 m,地表平面宽 3 m,模型总宽度为 5 m。图 11 中 AB 段为纵向裂隙,距坑道边缘 0.5 m,深 2.0 m,BC 段为可能出现的扩展裂隙。

通过对原状土样进行物理性质试验,得其力学参数为:重度(γ)17 kN/m³,黏聚力(c)28 kPa,内摩擦角(φ)24°,弹性模量(E)38 MPa,泊松比(ν)0.28。模型采用位移边界约束,左右两侧仅对 X 方向进行约束,底部则对 X、Y 两个方向进行约束。

4.3 计算工况

4.3.1 自然状态

自然状态下,只考虑土体自重对坑壁稳定性系数的影响。

4.3.2 地震作用

汉阳陵地处陕西省咸阳市泾阳县,抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度为 0.2 g。采用拟静力分析法对地震作用下的坑壁进行稳定性分析^[30-31],水平方向地震惯性力 F_{hi} 的计算如式(3)。

$$F_{hi} = a_h \xi W_i \alpha_i / g \quad (3)$$

式中: a_h ——设计水平地震加速度/(m·s⁻²);

ξ ——折减系数,取值为 0.25;

W_i ——质点 i 的重力/(kN);

α_i ——质点的动态分布系数,取值为 1.75;

g ——重力加速度,取值为 9.81 m/s²。

4.3.3 人为荷载

外藏坑虽然采用全封闭式玻璃保护厅,但仍有人因巡视、检修等日常维护工作进入外藏坑,根据《建筑结构荷载规范》^[32],选取荷载计算值为 2 kN/m²。

4.4 纵向卸荷裂隙对稳定性影响分析

纵向卸荷裂隙为图 11 中 AB 段,有无纵向裂隙坑壁稳定性计算结果如表 2 所示。从表中可以看出,当

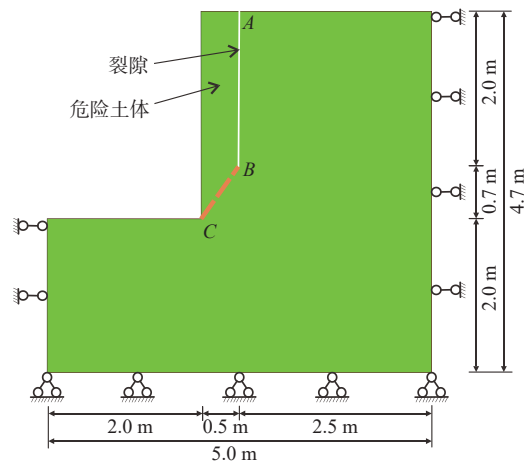


图 11 外藏坑计算模型

Fig. 11 Calculation model of outer storage pit

坑壁没有纵向卸荷裂隙时,在自然状态下处于稳定性状态,地震和人为荷载工况下均为欠稳定状态。当坑壁出现卸荷裂隙时,在不同工况下稳定性系数均发生了减小。在地震和人为荷载作用下,坑壁均处于不稳定状态。其中,对地震工况影响最大,是由于地震作用的水平力会牵引板柱状土体向临空面发生偏移变形,更易发生失稳破坏。

表 2 不同情况下稳定性系数计算结果

Table 2 Influence of slope distance on safety factor

纵向卸荷裂隙状况	稳定系数		
	自然状态	地震作用	人为荷载
无纵向卸荷裂隙	1.99	1.03	1.05
有纵向卸荷裂隙	1.78	0.55	0.92

图 12—图 14 给出了不同工况下坑壁应变分布。从图中可以看出,当坑壁上无纵向卸荷裂隙时,剪应变会由上向下发展,最大剪应变出现在坡顶处,最终与坡脚贯通。滑动面上部为直线下部为弧形,这也解释了现存卸荷裂隙为竖直向下的直线。当坑壁上产生纵向卸荷裂隙后,滑动面均从裂隙的尖端向坡脚延

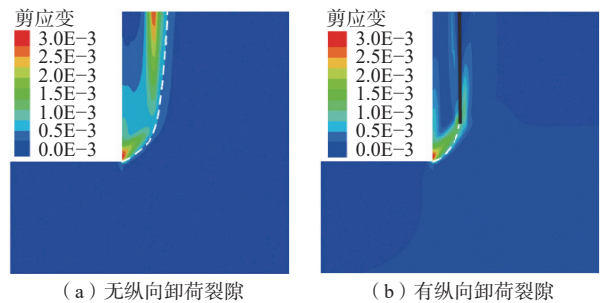


图 12 自然状态下剪应变

Fig. 12 Shear strain under natural condition

伸。在自然状态下,滑动面为弧形,在地震和人为荷载作用下均为直线,水平夹角约为 58°。

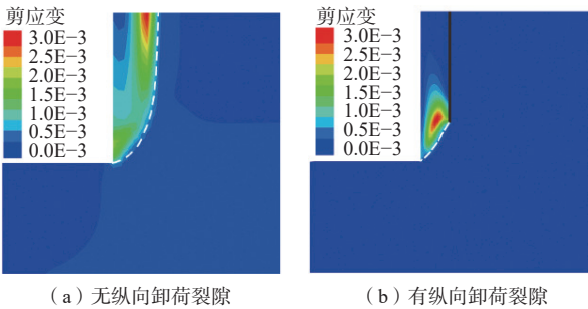


图 13 地震作用下剪应变

Fig. 13 Shear strain under seismic action

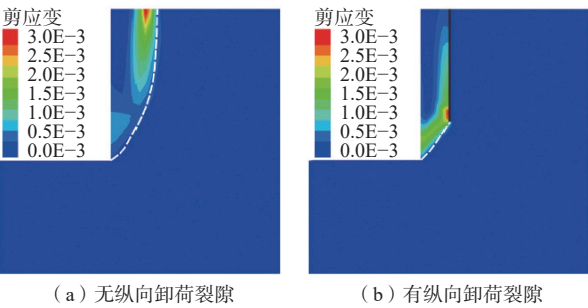


图 14 人为荷载下剪应变

Fig. 14 Shear strain under live load

4.5 倾斜扩展裂隙对稳定性的影响

扩展裂隙为图 11 中 BC 段,其扩展长度对坑壁稳定性系数影响如表 3 所示。从表中可以看出,当纵向裂隙沿着尖端向坡脚扩展时,坑壁的稳定性系数随扩展裂隙长度的增加而急剧降低。当扩展裂隙长度小于 0.172 m 时,自然状态下坑壁处于稳定状态。当扩展裂隙长度发育至 0.344 m 时,坑壁将发生失稳。因此,为防止坑壁裂隙继续扩展而影响其稳定性,应及时对外藏坑进行加固处理。

表 3 扩展裂隙的长度对稳定性的影响

Table 3 Influence of length of extended crack on safety factor

工况	扩展裂隙长度/m				
	0.00	0.172	0.344	0.516	0.688
自然状态	1.78	1.36	0.94	0.12	0.04
地震作用	0.55	0.12	0.03	—	—
人为荷载	0.92	0.58	0.12	0.01	—

注: 裂隙尖端与坡脚处的直线距离为 0.86 m。

4.6 失稳破坏特征

随着裂隙的不断发育,坑壁土体呈现为板柱状,在自重及外部荷载的作用下,其重心发生外移,导致卸荷裂隙尖端附近应力集中。当土体的抗剪强度不

足以抵抗自重及外部荷载的作用时,扩展裂隙发育,最终土体发生失稳崩塌现象。如图 15 所示,在失稳破坏的过程中,危险土体会向临空侧倾倒,崩塌的土体会对坑底文物造成损害。

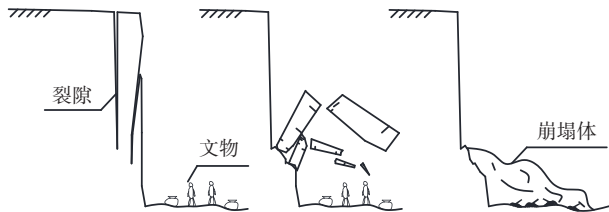


图 15 失稳破坏模式

Fig. 15 Failure mode of instability

5 加固措施

通过稳定性分析可知,无论是地震、人为荷载还是裂隙进一步发育,外藏坑都将发生失稳。因此,应及时采取合理的加固方案对外藏坑进行保护。考虑外藏坑的坑壁形式和展示需求,选用锚杆加固最为合适。锚杆加固土遗址在我国的应用技术较为成熟,有多个成功的案例^[33-34],锚杆加固不仅可以提高坑壁的稳定性,还可以通过施加预应力将宽度较大的卸荷裂隙进行复位和预紧,防止裂隙进一步发育。

锚杆加固模型同 4.2 节所示,竖向布置一根锚杆,位置在地表下 1 m 处,横向间距 2 m,锚杆水平夹角为 15°,长度 1.5 m,弹性模量 1.95×10^{11} Pa,泊松比 0.28,抗拉强度 310 MPa。数值模拟结果如下:

图 16 为加固后的剪应变,存在裂隙的边坡在锚固后稳定性系数均有所提高,地震作用和行人荷载下的稳定性系数分别为 2.23, 2.41,坑壁处于稳定状态。可见,锚杆加固可以大大提高坑壁的稳定性,但其钻孔方式、锚杆类型等具体方案需要在专项试验后确定。

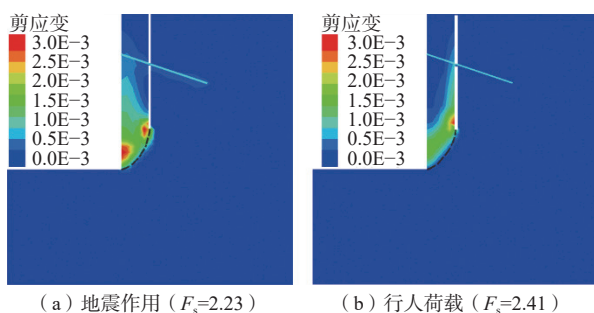


图 16 加固后的剪应变

Fig. 16 Shear strain after reinforcement

6 结论

(1) K21 号外藏坑共 53 条裂隙,裂隙主要分布于

坑道长方向的南、北侧地表和坑壁。地表上纵向裂隙发育严重,具有长而宽的特点,横向裂隙宽度较小,与纵向裂隙呈“十”字形相交。

(2) 地表纵向裂隙是由发掘产生的卸荷裂隙,地表横向裂隙和与其对应的坑壁竖向裂隙是由土体单向蒸发产生的干缩裂隙,其余坑壁裂隙属于原生的黄土垂直构造裂隙。

(3) 地表纵向卸荷裂隙和横向干缩裂隙将坑壁“切割”成板柱状土体,纵向卸荷裂隙降低了坑壁稳定性,在地震、人为荷载作用下及裂隙进一步发育时,坑壁将发生失稳。

(4) 可采用锚杆对外藏坑进行加固,通过施加预应力对卸荷裂隙进行复位和预紧,防止裂隙进一步发育。加固前建议进行专项试验。

参考文献 (References) :

- [1] 孙满利, 陈彦榕, 沈云霞. 土遗址病害研究新进展与展望 [J]. 敦煌研究, 2022(2): 136 - 148. [SUN Manli, CHEN Yanrong, SHEN Yunxia. New progress and prospects in research on earthen site deterioration [J]. Dunhuang Research, 2022(2): 136 - 148. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 孙华. 遗址博物馆的特点与规建 [J]. 东南文化, 2022(4): 14 - 24. [SUN Hua. The characteristics of heritage site museums and their planning and constructions [J]. Southeast Culture, 2022(4): 14 - 24. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 孔利宁. 考古博物馆的缘起与演进 [J]. 文博, 2018(2): 100 - 105. [KONG Lining. The origination and evolution of archaeological museum [J]. Relics and Museology, 2018(2): 100 - 105. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 黄四平, 高衡. 密闭环境下地下水分变化对唐皇城墙含光门土遗址的影响研究 [J]. 文物保护与考古科学, 2022, 34(4): 97 - 104. [HUANG Siping, GAO Heng. Study of the influence of groundwater changes on the earthen site of Xi'an Tang Hanguang Gate Museum in a closed environment [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2022, 34(4): 97 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [5] LERCARI N. Monitoring earthen archaeological heritage using multi-temporal terrestrial laser scanning and surface change detection [J]. Journal of Cultural Heritage, 2019, 39: 152 - 165.
- [6] FUJII Y, FODDE E, WATANABE K, et al. Digital

- photogrammetry for the documentation of structural damage in earthen archaeological sites: The case of Ajina Tapa, Tajikistan[J]. *Engineering Geology*, 2009, 105(1/2): 124 – 133.
- [7] 周鹏, 胡明珠, 王逢睿, 等. 哈密境内烽燧土遗址破坏类型及成因分析 [J]. *工程勘察*, 2015, 43(10): 25 – 28. [ZHOU Peng, HU Mingzhu, WANG Fengrui, et al. The damage type and cause analysis of the beacon relics in Hami[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2015, 43(10): 25 – 28. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王思嘉. 博物馆环境下土遗址气—液相变补水的可行性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017. [WANG Sijia. Study on the feasibility of replenishment for soil sites in museum environment by phase transition of water[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张平, 陈志龙, 李居西. 汉阳陵帝陵地下遗址博物馆建筑设计探析 [J]. *工业建筑*, 2008, 38(7): 120 – 123. [ZHANG Ping, CHEN Zhilong, LI Juxi. Study on the design of museum architecture of Yang Ling of the Han dynasty relics of underground[J]. *Industrial Construction*, 2008, 38(7): 120 – 123. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 黄姣. 汉阳陵土遗址保存现状调查研究 [D]. 西安: 西北大学, 2017. [HUANG Jiao. Investigation and study on the preservation of earthen sites in hanyangling[D]. Xi'an: Northwest University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 焦南峰. 汉阳陵从葬坑初探 [J]. *文物*, 2006(7): 51 – 57. [JIAO Nanfeng. A preliminary study on the burial pit of Hanyang mausoleum[J]. *Cultural Relics*, 2006(7): 51 – 57. (in Chinese)]
- [12] 刘克成, 肖莉. 汉阳陵帝陵外藏坑保护展示厅 [J]. *建筑学报*, 2006(7): 68 – 70. [LIU Kecheng, XIAO Li. Protective exhibition hall for the outer burial pits of emperor mausoleum in Yangling of the Han dynasty[J]. *Architectural Journal*, 2006(7): 68 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李莹莹. 汉阳陵遗址展示厅的气密性和土壤环境及其对文物的影响 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2010. [LI Yingying. Air tightness and soil environment of the exhibition hall of Hanyang mausoleum site and its influence on cultural relics[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 焦南峰, 王保平, 马永赢, 等. 汉阳陵帝陵东侧 11 ~ 21 号外藏坑发掘简报 [J]. *考古与文物*, 2008(3): 3 – 32. [JIAO Nanfeng, WANG Baoping, MA Yongying, et al. Brief report on excavation of No. 11 ~ No. 21 outer pit on the east side of Hanyang mausoleum[J]. *Archaeology and Cultural Relics*, 2008(3): 3 – 32. (in Chinese)]
- [15] 赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 等. 不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 74 – 80. [ZHAO Danqi, FU Yukai, HOU Xiaokun, et al. Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 74 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 孙书勤, 裴向军, 袁广, 等. 饱和黄土卸载特性影响因素研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 59 – 63. [SUN Shuqin, PEI Xiangjun, YUAN Guang, et al. Influencing factors for unloading characteristics of saturated loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 59 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 黄达, 黄润秋. 卸荷条件下裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化的物理模型试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(3): 502 – 512. [HUANG Da, HUANG Runqiu. Physical model test on deformation failure and crack propagation evolvement of fissured rocks under unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(3): 502 – 512. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 郑达, 毛峰, 王沁沅, 等. 上硬下软反倾边坡开挖变形响应的物理模拟 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 89 – 95. [ZHENG Da, MAO Feng, WANG Qinyuan, et al. Physical simulation of the excavation deformation response of counter-tilt slope with rigid layers on the soft[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 89 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 胡荣兵, 任光明, 刘晓宇. 某水电站左岸坝基岩体卸荷松弛特征与形成机制 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 139 – 144. [HU Rongbing, REN Guangming, LIU Xiaoyu. Unloading relaxation characteristics and mechanism of the rockmass at left bank dam foundation of a hydropower station[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 139 – 144. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 时俊, 万磊, 谭卫佳, 等. 考虑土体侧向卸荷的基坑变形预测 [J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(2): 61 – 66. [SHI Jun, WAN Lei, TAN Weijia, et al. Deformation prediction of excavation of lateral unloading

- soil[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 41(2): 61 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 容波. 秦俑一号坑土遗址裂隙观测研究初报 [C]//李最雄, 王旭东. 2008 古遗址保护国际学术讨论会暨国际岩石力学学会区域研讨会论文集, 北京: 科学出版社, 2008. [RONG Bo. Preliminary report on the observation and research of fissures at the No. 1 pit site of the Qin Warriors[C]//LI Zuixiong, WANG Xudong. Proceedings of the 2008 International Symposium on Ancient Site Conservation and the Regional Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]
- [22] 宋京雷, 何伟, 郝社锋, 等. 岩质边坡表层黏性客土抗裂特性试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(3): 144 – 149. [SONG Jinglei, HE Wei, HAO Shefeng, et al. An experimental study of the anti-cracking characteristics of foreign-clay based on rock slope[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): 144 – 149. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 孙强, 龚绪龙, 张玉良, 等. 黏土失水干缩裂缝发育动态试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(5): 144 – 147. [SUN Qiang, GONG Xulong, ZHANG Yuliang, et al. A study of the dynamic experimental of clay desiccation cracking process[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(5): 144 – 147. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理 [J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(8): 1415 – 1423. [TANG Chaosheng, SHI Bin, CUI Yujun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(8): 1415 – 1423. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究 [J]. *工程地质学报*, 2011, 19(6): 875 – 881. [TANG Chaosheng, SHI Bin, GU Kai. Experimental investigation on evaporation process of water in soil during drying[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(6): 875 – 881. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 卢全中, 彭建兵, 陈志新, 等. 黄土高原地区黄土裂隙发育特征及其规律研究 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 191 – 194. [LU Quanzhong, PENG Jianbing, CHEN Zhixin, et al. Research on characteristics of cracks and fissures of loess and their distribution in loess plateau of China[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(5): 191 – 194. (in Chinese with English abstract)]
- [27] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. *Géotechnique*, 1975, 25(4): 671 – 689.
- [28] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. *Soils and Foundations*, 1992, 32(1): 59 – 70.
- [29] 中华人民共和国建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB/T 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB/T 50330—2013[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2013. (in Chinese)]
- [30] NOURI H, FAKHER A, JONES C J F P. Development of Horizontal Slice Method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2006, 24(3): 175 – 187.
- [31] NOURI H, FAKHER A, JONES C J F P. Evaluating the effects of the magnitude and amplification of pseudo-static acceleration on reinforced soil slopes and walls using the limit equilibrium Horizontal Slices Method[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(3): 263 – 278.
- [32] 中华人民共和国建设部. 建筑结构荷载规范: GB/T 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Load Code for Building Structures: GB/T 50009—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012. (in Chinese)]
- [33] 孙满利, 李最雄, 王旭东, 等. 南竹加筋复合锚杆加固土遗址研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增刊 2): 3381 – 3385. [SUN Manli, LI Zuixiong, WANG Xudong, et al. Study on reinforcement of earthen sites by bamboo-steel composite anchor[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Sup 2): 3381 – 3385. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 石玉成, 秋仁东. 木质锚杆加固土遗址边坡的稳定性分析 [J]. *地震工程学报*, 2015, 37(3): 809 – 815. [SHI Yucheng, QIU Rendong. Stability analysis of earthen slope sites reinforced with wood anchors[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, 37(3): 809 – 815. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农