



三星堆遗址祭祀坑稳定性影响因素分析及防控

赵凡^{1,2}, 胡芮², 孙满利¹, 郭青林^{1,3}, 周鑫⁴, 孟庆祥⁴

1. 西北大学 文化遗产学院, 陕西 西安 710127; 2. 四川省文物考古研究院, 四川 成都 610041;
3. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200; 4. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024

摘要 为保证三星堆遗址祭祀坑在考古发掘过程中的结构安全, 根据坑体三维点云数据和坑顶卸荷裂隙的测量结果, 运用约束 Delaunay 三角剖分技术建立考虑裂隙空间结构的高精三维网格模型, 采用 ABAQUS 软件计算在分层开挖、设备堆载、人员踩踏、地震作用 4 种工况条件下的水平位移或振动速度, 据此分析各种工况条件对坑体稳定性的影响, 采取针对性的坑体结构稳定现场防控措施。结果表明, 坑体结构稳定防控的最不利条件为设备堆载工况下长边或短边距边缘小于 1.5 m, 人员踩踏工况下长边距边缘小于 0.3 m 或短边距边缘小于 0.2 m, 地震作用工况下烈度高于Ⅵ级; 重点对象为 K3、K6 + K7、K8 的坑顶长边边缘中部, 尤其是卸荷裂隙发育位置。研究认为, 一方面可利用日常管理对设备堆载、人员踩踏等人为可控因素进行必要的防范, 另一方面采用临时支护结构对地震作用等自然不可抗力进行一定的应对, 发挥主动预防和被动控制两项措施的协同作用, 有效抑制坑体结构变形发展。

关键词 土遗址; 三星堆遗址; 祭祀坑; 稳定性分析; 日常管理; 支护结构

中图分类号: K878.6 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-02-005

Stability analysis and protective measures for the sacrificial pits at Sanxingdui Site

ZHAO Fan^{1,2}, HU Rui², SUN Manli¹, GUO Qinglin^{1,3},
ZHOU Xin⁴, MENG Qingxiang⁴

1. College of Culture Heritage, Northwest University, Xi'an 710127, China;
2. Sichuan Provincial Cultural Relics and Archeology Research Institute, Chengdu 610041, China;
3. Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China;
4. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,
Hohai University, Nanjing 210024, China

Abstract Maintaining structural stability is a prerequisite for the safe conservation of archaeological sites. To ensure the structural stability of the sacrificial pits during the excavation process at the Sanxingdui Site, a study was carried out on the influencing factors and protective measures of the sacrificial pits stability. Firstly, a

收稿日期: 2025-09-10 修回日期: 2025-12-15

基金项目: 四川省科技计划项目(2023YFS0463); “三星堆遗址考古研究与遗产保护”专项课题(SXD2025-04); 四川省省级科研院所基本科研业务项目(24JBKY0006006)。

第一作者: 赵凡, 男, 博士研究生, 研究员, 从事岩土文物保护研究, zhaofan_163@163.com。

通信作者: 孟庆祥, 男, 副教授, 从事岩土力学与工程、工程智能化等研究, mqx@hhu.edu.cn。

high-precision three-dimensional model was constructed based on the three-dimensional point cloud data of the pit body and the measurement results of the pit top unloading fractures. Subsequently, the Delaunay triangular decomposition method with constraints was employed to establish a three-dimensional grid model incorporating the spatial structure of the fractures. Finally, the horizontal displacement or vibration speed of the pit body under layered excavation, equipment loading, crowd standing, and earthquake action was calculated using the ABAQUS software. Based on the results above, the influence of various conditions and scenarios on the stability of the pit body was analyzed. On this basis, targeted preventive and control measures were adopted to maintain the stability of the pit body. The above research findings indicate that the equipment loading scenario with the long or short side less than 1.5m from the edge, the crowd standing scenario with the long side less than 0.3m or the short side less than 0.2m from the edge, and the earthquake action scenario with a magnitude of VI or above are the most unfavorable conditions for the structural stability control of the pit body. The middle part of the long side of K3, K6 + K7, and K8, especially the location of the unloading fractures, is the key object of structural stability control. Therefore, on the one hand, we utilize routine management to implement necessary prevention and control of human-controllable factors such as equipment loading and crowd standing. On the other hand, we employ temporary support structures to cope with natural uncontrollable forces such as earthquakes. Through the combination of proactive prevention and passive control measures, the structural deformation of the pit body has been effectively controlled.

Keywords earthen sites; Sanxingdui Site; sacrificial pits; stability analysis; routine management; support structure

结构安全是考古遗址长久保存的前提。潮湿环境下,土质考古遗址由于赋存水环境的特点,在高含水率状态下土体力学强度低,自稳能力差。尤其在考古发掘阶段,由于开挖卸荷,土体应力场及温湿度场急剧变化并耦合作用,往往发育裂隙、坍塌等结构性病害^[1-3]。2019年底,三星堆遗址祭祀区开始新一轮考古发掘,揭露6座祭祀坑,属于典型的潮湿环境土坑类考古遗址。其既是地下文物的埋藏环境,又是祭祀活动的实物遗存,具有重要的文物价值。为了真实、完整地保存祭祀坑的原状,考古发掘过程中开展了较为全面系统的现场保护工作^[4]。观察发现,祭祀坑在开挖至坑底提取埋藏文物的过程中,由于设备堆载、人员踩踏、地震作用等动静荷载影响,坑顶局部卸荷裂隙发育严重,进一步发展可能导致坑体变形失稳,威胁坑底考古人员和埋藏文物的安全。为了保证祭祀坑的结构安全,亟需明确影响其稳定性的因素,从而采取针对性的现场防控措施。为此,采用数值模拟为上述决策提供相对科学的依据。

目前,土遗址稳定性分析主要采用岩土工程等领域常用的数值模拟方法,对象包括地面修筑的城墙、佛塔等和地下开挖的考古探方、地宫、埋藏坑等,工况涉及遗址自重、附加荷载、渗流、地震、振动等。例如 Wany, 等采用 FLAC3D 软件分

析了良渚遗址,模拟考古探方四壁的变形情况,分析结果与现场监测吻合^[5];王彦武等采用 FLAC3D 软件分析了古浪县明长城墙体在静力作用下,不同掏蚀深度的位移场和应力场,探讨了掏蚀深度对墙体安全系数及塑性变形的影响^[6];淳庆等采用 ANSYS 软件分析了大报恩寺遗址地宫在多种工况下的现状及加固结构性能,建议采用不锈钢护壁及水平、竖向锚杆加固遗址^[7];秦立科等采用 UDEC 软件分析了汉阳陵遗址 K21 号外藏坑坑壁,在多种工况下纵向卸荷裂隙和倾斜扩展裂隙对稳定性的影响,建议采用锚杆加固坑壁^[8];姜枫等采用 ABAQUS 软件分析了白口城遗址北城墙在不同降雨工况下的渗流、应力应变规律及稳定性,揭示了墙体的破坏模式^[9];董梅等采用 PLAXIS3D 软件分析了良渚遗址老虎岭水坝在 8 种降雨工况下的稳定性,建议开展危险滑裂面的监测和边坡排水^[10];谌文武等采用 FLAC3D 软件分析了苏巴什佛寺佛塔在地震作用下的位移、应力、加速度放大系数及傅里叶谱,探讨了地震对佛塔的破坏方式及动力响应^[11];常鹏等采用 ANSYS 软件分析了虎门遗址在车辆轴重、行驶速度影响下的振动响应等,探讨了振动对遗址的影响^[12]。

上述研究主要采用基于遗址轮廓的概化模

型,对于形态不规则且存在裂隙等结构面的复杂对象,模型几何精度不能准确反映遗址实际,导致分析结果与真实情况存在一定差异。尤其对于发掘阶段的考古遗址,受发掘方式、设备堆载、人员踩踏等人为因素和地震作用等不可抗力的影响,往往结构变形明显,一旦失稳将对考古人员的生命和埋藏文物的安全造成严重危胁。因此,开展精细化的考古遗址稳定性影响因素分析,据此采取针对性的防控措施以保证遗址结构稳定,具有重要的实践意义。

本研究围绕三星堆遗址祭祀坑的现场保护工作需求,根据坑体三维点云数据和坑顶卸荷裂隙的测绘结果,建立考虑裂隙空间结构的高精三维网格模型,进一步采用 ABAQUS 软件计算在分层开挖、设备堆载、人员踩踏、地震作用 4 种工况下的水平位移或振动速度,据此分析各工况条件对坑体稳定性的影响,以采取针对性的坑体结构稳

定措施。本研究方法运用约束 Delaunay 三角剖分技术,建立考虑外部形态褶皱和内部裂隙结构的高精三维网格模型,能够更为真实、精细地反映遗址的力学行为。本研究成果可以为祭祀坑现场保护工作提供指导,丰富潮湿环境下土质考古遗址稳定性分析及防控方面的实践。

1 祭祀坑现状

1.1 祭祀坑概况

三星堆祭祀区考古遗址位于马牧河南岸Ⅱ级阶地边缘,发掘面积 1 202 m²,揭露 6 座祭祀坑和沟槽、小型圆形坑、房址等祭祀活动遗迹^[4](见图 1)。祭祀坑编号 K3~K8,均为竖向土坑,其中由于 K6 打破 K7,将两者合并为一处,共计 5 个。坑口大致呈方形,坑壁略倾斜,坑底较平整,尺寸大小差异明显,基本信息见表 1。

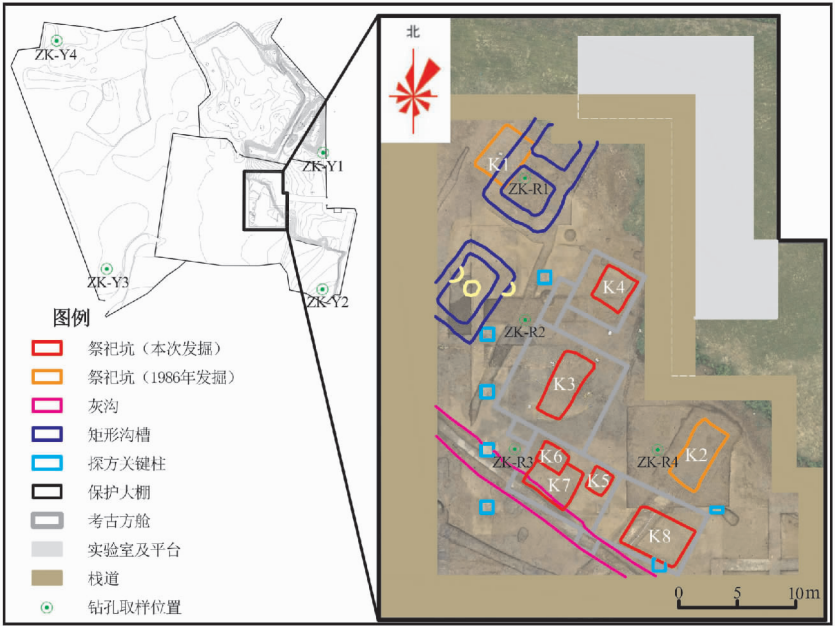


图 1 祭祀区遗迹分布图
Fig. 1 Distribution of remains in the sacrificial area

表 1 祭祀坑基本信息
Tab. 1 Basic information of the sacrificial pits

	祭祀坑编号	K3	K4	K5	K6 + K7	K8
形态	坑口形状	长方形	正方形	长方形	不规则	长方形
	坑壁倾斜度	局部略内倾	略外倾	竖直	略外倾	略外倾
	坑底平整度	较平整	不平整（南侧 为土台）	较平整	较平整	较平整

续表 1

祭祀坑编号		K3	K4	K5	K6 + K7	K8
尺寸/m	长轴	5.66 ~ 5.78	2.92 ~ 3.14	2.01 ~ 2.03	4.17 ~ 4.30	5.03 ~ 5.20
	短轴	2.62 ~ 2.20	2.93 ~ 2.96	1.60 ~ 1.66	3.97 ~ 4.10	3.60 ~ 4.03
	深度	1.75 ~ 1.88	1.44 ~ 1.62	0.56 ~ 0.75	1.44 ~ 1.65	1.56 ~ 1.65
平面正射影像						

1.2 地质条件

三星堆祭祀区地层由上至下为第四系全新统耕植土(Q_4^{pd})、人工填土(Q_4^{ml})、黏土(Q_4^{al+pl})、粉质黏土(Q_4^{al+pl})、砂卵石(Q_4^{al+pl})和第四系上更新统砂砾卵石(Q_3^{gl+al})(见图2),发掘前期揭除上部厚度1~1.5 m的晚期文化层,祭祀坑所在地层主要为粉质黏土。地下水类型为松散岩类孔隙水,主

要赋存于第四系砂卵石及砂砾卵石层,水位埋深常年在4.18~4.78 m,微承压,渗透系数为4.56~7.94 m/d,富水性等级为中等—强富水性。上层土渗透系数为 $2.07 \times 10^{-5} \sim 3.41 \times 10^{-5}$ cm/s,渗透性差。第四系覆盖层较厚,中密—密实砂砾卵石层工程力学性质较好,是良好的天然地基基础持力层,无不良地质作用^[13]。



图2 祭祀区地层剖面(ZK-Y3)

Fig. 2 Stratigraphic profile of the sacrificial area

1.3 土的性质

按照取样尽量减小对遗址破坏的原则,一方面,在土壤传感器埋设时,采用洛阳铲在遗址本体4个钻孔(编号ZK-R)连续以20 cm间距取扰动

土样40件,测试其主要物理性质(见图3)。另一方面,在综合地质勘察时,采用取样器在遗址外围4个钻孔(编号ZK-Y)非连续不等间距取原状土样19件,测试其主要物理及力学性质(见图4)。

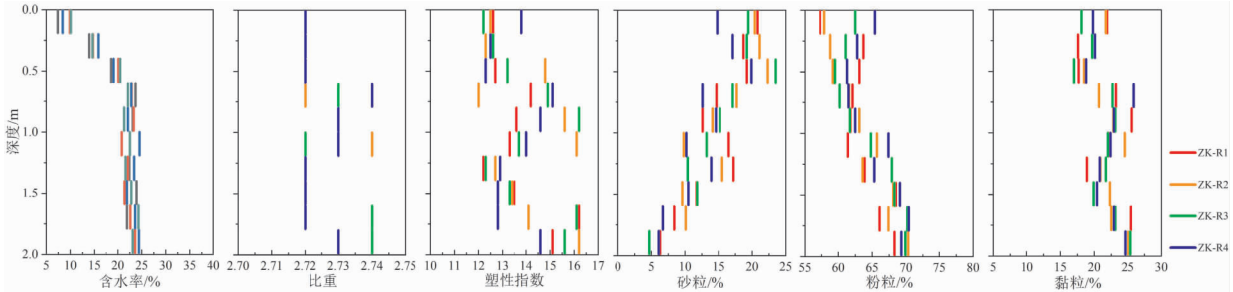


图3 扰动土样主要物理性质

Fig. 3 Main physical properties of disturbed soil samples

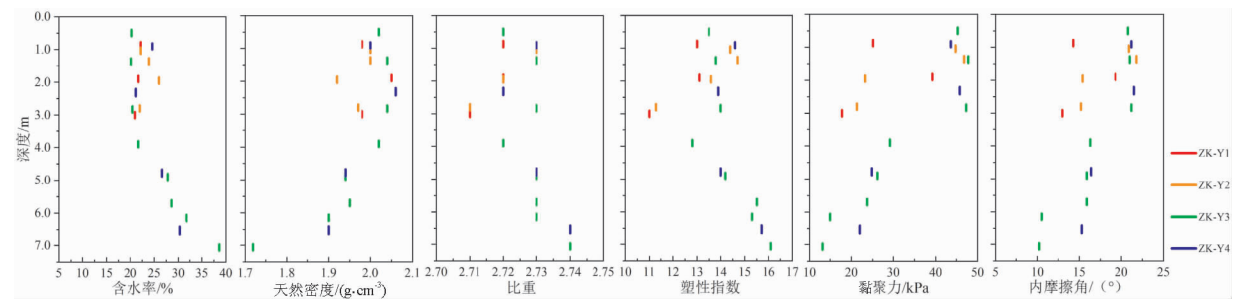


图 4 原状土样主要物理及力学性质

Fig. 4 Main physical and mechanical properties of original soil samples

由图 3 和图 4 可见,祭祀坑分布及影响深度范围内,地层土样部分物理性质随深度表现出一定的规律性。扰动土样含水率距地表 0.6 m 以上为 7.4%~20.5%,随深度增加不断增大,主要是由于长期单向蒸发所致;距地表 0.6 m 以下含水率为 20.8%~24.4%,变化不明显。原状土样含水率距地表 4 m 以上为 20.2%~26.0%,距地表 4 m 以下为 26.6%~38.6%;比重为 2.71~2.74;塑性指数为 11.0~16.1。扰动土样颗粒组成以粉粒为主,质量分数为 57.3%~70.4%,黏粒次之;随深度增加粉粒含量不断增大,砂粒含量不断减小。原状土样的天然密度集中在 1.90~2.05 g/cm³;黏聚力为 13.1~47.8 kPa,内摩擦角为 10.2~21.8°。

1.4 卸荷裂隙

前期祭祀坑由上至下分层开挖至接近坑底的过程中,未见卸荷裂隙发育;后期开挖至坑底提取埋藏文物过程中,由于考古现场设备堆载、人员踩

踏等因素影响,加之期间省内发生数次 6 级以上地震,坑顶局部卸荷裂隙发育严重。如果不采取及时有效的防控措施,该裂隙将进一步发展,甚至导致坑体局部或整体变形失稳,威胁坑底考古人员和埋藏遗物的安全。

卸荷裂隙发生于 K3、K6 + K7 和 K8 坑顶局部,主要分布在距边缘 20~40 cm 范围内,迹线走向大致呈平行坑壁的折线形,向下竖向延伸。大多数开口宽度为 8~20 mm,延伸深度为 30~60 cm。其中,K3 坑顶东西两侧卸荷裂隙(见图 5)发育最为严重,尤其是东侧裂隙[见图 5(a)],完全贯穿坑顶,最大宽度可达 24 mm,最大深度可达 80 cm 以上。卸荷裂隙均发生于祭祀坑开挖至坑底后较短时间(1~3 个月),经历了前期快速张开并扩展延伸,后期逐渐趋于稳定的过程。随着临空面土体结构变形的进一步发展,卸荷裂隙不断发育,并与坑壁干缩裂隙等交切,形成相对孤立的土体或土块。

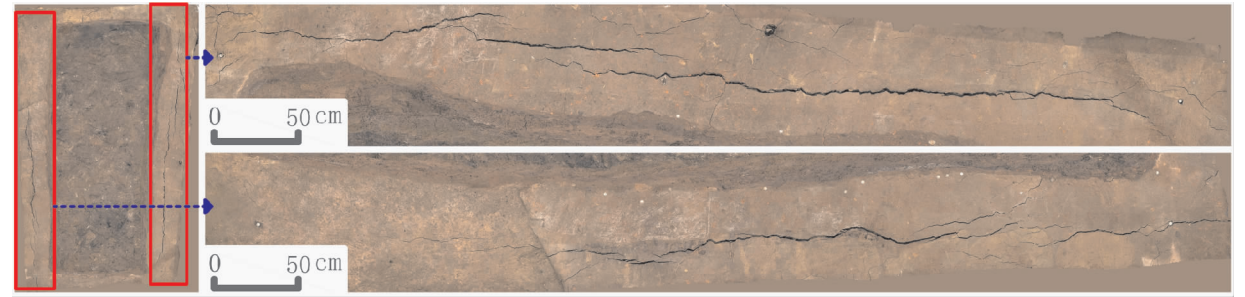


图 5 K3 坑顶东西两侧卸荷裂隙分布

Fig. 5 Unloading fractures distribution on the east and west sides of the pit top of K3

2 计算模型与参数

2.1 模型建立

首先根据坑体三维点云数据[见图 6(a)],采用 Rhino 软件网格工具对建模几何进行离散化处理,生成坑体三维网格模型[见图 6(b)];然后

在该模型基础上,根据坑顶卸荷裂隙的测量结果[见图 6(c)],按照裂隙空间展布和尺寸大小(迹线坐标、开口宽度、延伸深度、倾角等),基于 Python 语言编制相应脚本文件,对二维裂隙线段三维拉伸进行参数化建模,生成包含主要结构面的高精三维网格模型[见图 6(d)];进一步采用约束 Delaunay 剖分和网格优化技术,建立考虑裂隙

空间结构的高精三维网格模型;最后将该模型导入非线性有限元软件 ABAQUS 中,建立祭祀坑坑体稳定性分析计算模型[见图 6(e)]。

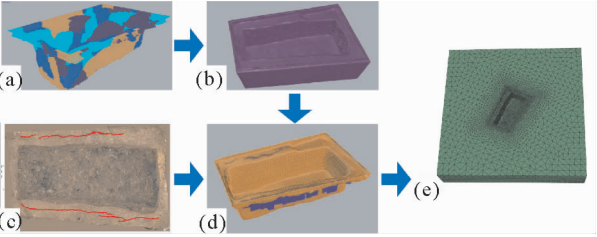


图 6 模型建立方法

Fig. 6 Methods for model building

为了实现裂隙面形态的数字化建模,采用基于多段线几何拉伸的方法,将裂隙中心线拉伸为裂隙面。此方法通过对裂隙顶点坐标数组进行方向性拉伸,生成裂隙面的四边形网格顶点坐标。通过裂隙单位法向量,生成裂隙面的顶点集合。通过控制法向量的方向性和裂隙深度参数,沿法向量正负方向分别拓展简化后的中心线段,形成裂隙面。对于中心线段的起点和终点,其四边形面片顶点的坐标计算为:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_s + h \cdot v_{\text{法,norm}}, p_2 = p_e + h \cdot v_{\text{法,norm}}, \\ p_3 &= p_e + h \cdot v_{\text{法,norm}}, p_4 = p_s + h \cdot v_{\text{法,norm}} \end{aligned} \tag{1}$$

其中, p_s 和 p_e 分别为当前中心线段的起点和终点。

通过对简化中心线的每段执行上述拓展操作,最终获得裂隙面顶点坐标集合,表示为

$$\text{surface_vertices} = \{[p_1, p_2, p_3, p_4]\}_{i=1}^{m-1} \tag{2}$$

为避免重复定义,脚本将边两端点的中点坐标作为唯一标志符(即边关键字),表示为

$$\text{EdgeKey} = \left[\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2}, \frac{z_1 + z_2}{2} \right] \tag{3}$$

考虑到裂隙面为多个四边形面片构成的复杂几何对象,首先通过 ABAQUS 的 WirePolyLine 命令生成裂隙线框模型,然后利用 CoverEdges 方法封闭面片,最后形成完整的裂隙几何模型。在面片封闭的过程中,脚本自动处理线框之间的拓扑关系,并记录封闭失败的边。通过布尔运算(Instance From Boolean Merge)将所有面片合并为单个几何体,并删除临时生成的线框部件,保留最终的裂隙几何模型。

2.2 工况选择

祭祀坑发掘过程是由上至下分层开挖,前期主要清理坑内的填土和灰烬,后期重点提取坑底遗物。由于其重要的文物价值和极高的社会关注

度,现场采用了较多重型文物吊装、包装、转运等设备,并有大量考古发掘、文物保护、数字化测绘、后勤保障等人员参与。加之四川省地震活动具有发震频次高、震级强度大、分布不均匀、震害严重等特点,发掘期间曾有 3 次 6 级以上地震发生(见表 2),且不排除更高级别地震发生的可能。因此,选择分层开挖、设备堆载、人员踩踏、地震作用 4 种工况,每种工况设置不同条件,详见表 3。

表 2 2021—2022 年四川省 6 级以上地震基本信息
Tab. 2 Basic information on earthquakes of magnitude 6 or higher in Sichuan Province from 2021 to 2022

时间	震级	震中	距广汉市 距离/km
2021-09-16	6.0	泸州市泸县	240
2022-06-01	6.1	雅安市芦山县	130
2022-06-10	6.0	阿坝州马尔康市	280

注:数据来源为中国地震台网。

表 3 工况及条件详情
Tab. 3 Details of operating conditions and their scenarios

工况	条件
分层开挖	层厚约 0.3 m,层数按坑深除以层厚的结果取整数
设备堆载	设备质量 4 t,布置于坑顶沿通过坑体平面投影中点与长边中点、短边中点和对角点的直线共 3 个方向,每个方向包括距边缘 0.1、0.3、0.5 m 共 3 个点位
人员踩踏	单人质量 75 kg,按间距 0.3 m 单排站立,布置于坑顶平行长边和短边 2 个方向,每个方向包括距边缘 0.1、0.3、0.5 m 共 3 个点位
地震作用	Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ级烈度

2.3 边界条件

在静荷载作用分析时,模型四周节点约束 X、Y 方向位移,底部节点约束 X、Y、Z 方向位移。在动荷载作用分析时,模型底部作为动力输入边界,模型周边采用自由场边界,从而尽可能消除地震波对边界造成的影响,动力过程采用时程分析法进行模拟。

根据 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》,四川省广汉市峰值加速度 0.10 g,反应谱特征周期 0.45 s,标准设计反应谱最大值的代表值 β_{max} 取 2.25,地震烈度Ⅶ度设防,按Ⅱ类场地计算。地震动时程采用 2017 年四川省九寨沟地震中黑水台站记录的地震波,其时间间隔为 0.005

s,持续时长为 40 s。拟合反应谱精度 $\pm 10\%$ 。

2.4 材料参数

材料参数指标包括密度、弹性模量、泊松比、摩擦角和黏聚力,其中密度、摩擦角、黏聚力取与祭祀坑相同深度且距离最近位置原状土样的测试结果,弹性模量、泊松比取原状土样测试结果的平均值,材料参数取值见表 4。

表 4 材料参数取值
Tab.4 Values of material parameters

密度 /(kg/m ³)	弹性模量 /kPa	泊松比	摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa
2 000	4 630	0.3	15.2	21.3

其中,对于裂隙面的系列力学行为,采用无厚度内聚力单元模拟,仅考虑裂隙面的摩擦作用,假

定摩擦角与土体材料一致。

3 计算结果与分析

祭祀坑本质为形态复杂的小型土质基坑。考虑到坑体的形态特点和坑顶卸荷裂隙的发育情况,在附加荷载或地震作用的影响下,水平方向的结构变形或振动响应明显^[14-16]。为此,分别采用计算模型在静荷载和动荷载作用下的水平位移和振动速度,作为稳定性评价指标。

3.1 不同工况条件下最大水平位移或振动速度大小

不同工况条件下的最大水平位移和振动速度大小如图 7 所示。

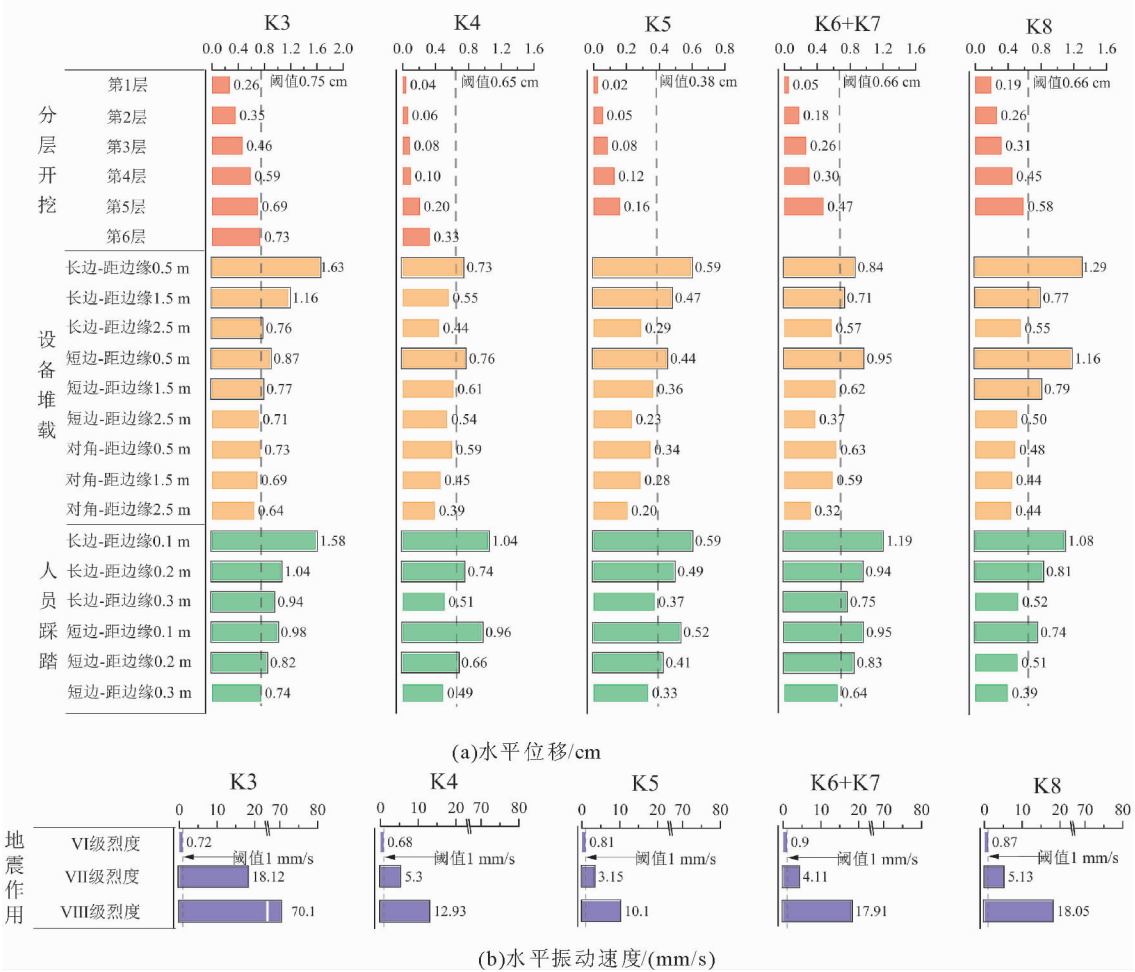


图 7 不同工况条件下水平位移或振动速度最大值

Fig. 7 Maximum horizontal displacement or vibration velocity under various operating conditions and their scenarios

由图 7 可见,各祭祀坑在分层开挖工况下,随深度增加,最大水平位移不断增大。在设备堆载工况下,相同方向随距边缘距离减小或相同距边缘距离按照对角、短边、长边的顺序,最大水平位

移不断增大。在人员踩踏工况下,相同方向随距边缘距离减小或相同距边缘距离按照短边、长边的顺序,最大水平位移不断增大。在地震作用工况下,随烈度增加,最大振动速度不断增大,且相

互之间差异更显著。

同时,不同祭祀坑在相同工况条件下,最大水平位移或振动速度总体表现出一定差异。总体上讲,坑体尺寸越大,最大水平位移或振动速度也越大,其中坑体边长、深度均与最大水平位移或振动速度呈正相关。例如 K3、K6 + K7 和 K8、K4 和 K5 三组坑体最大边长、深度依次减小,在相同工况最不利条件下,最大水平位移或振动速度也依

次减小。卸荷裂隙发育对最大水平位移或振动速度也有一定影响,例如 K3 坑顶东西两侧卸荷裂隙发育最严重,在相同工况条件下,最大水平位移或振动速度也最大。

3.2 各工况最不利条件下水平位移或振动速度分布

各工况最不利条件下的水平位移或振动速度分布如图 8 至图 11 所示。

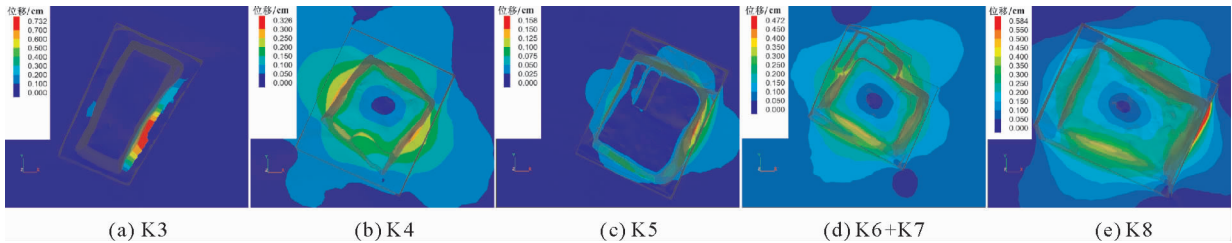


图 8 分层开挖工况开挖至坑底水平位移分布

Fig. 8 Horizontal displacement distribution when reaching the pit bottom under layered excavation conditions

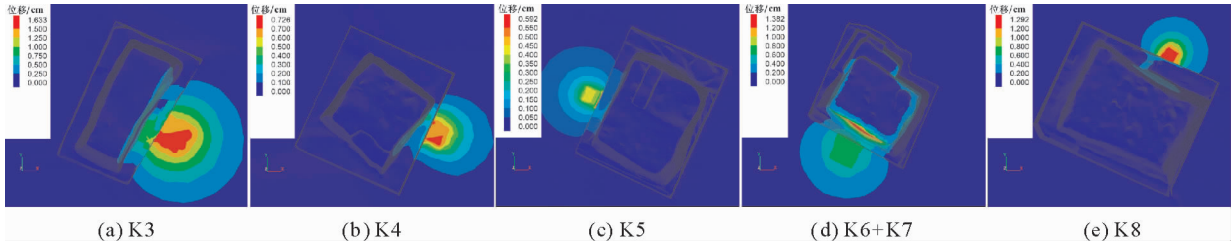


图 9 设备堆载工况长边距边缘 0.5 m 水平位移分布

Fig. 9 Horizontal displacement distribution at the edge 0.5 m from the pit long side under equipment loading conditions

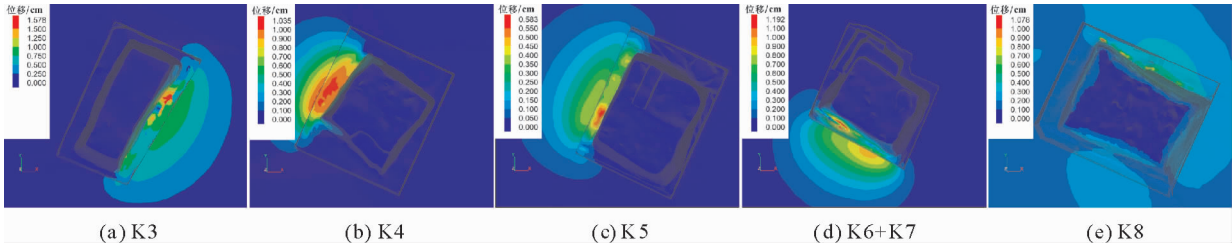


图 10 人员踩踏工况长边距边缘 0.1 m 水平位移分布

Fig. 10 Horizontal displacement distribution at the edge 0.1 m from the pit long side under crowd standing conditions

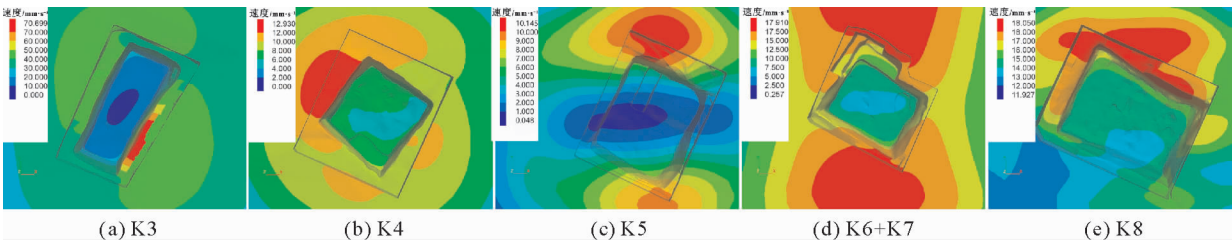


图 11 地震作用工况Ⅷ级烈度水平振动速度分布

Fig. 11 Horizontal vibration velocity distribution under the seismic action condition of intensity level VIII

3.2.1 分层开挖

由图 8 可见,各祭祀坑在分层开挖工况下开挖至坑底时,水平位移在坑顶四周平面投影大致呈半圆形,距离坑顶边缘中部越近,位移量越大。

最大位移集中分布于卸荷裂隙发育位置,以 K3 坑顶东侧卸荷裂隙位置最为明显。

3.2.2 设备堆载

由图 9 可见,各祭祀坑在设备堆载工况下,堆

载位置位于长边距边缘 0.5 m 时,水平位移在坑顶堆载侧面投影呈斑块形,距离坑顶堆载位置及边缘中部越近,位移量越大。

3.2.3 人员踩踏

由图 10 可见,各祭祀坑在人员踩踏工况下,踩踏中线位于长边距边缘 0.1 m 时,水平位移在坑顶踩踏侧面投影大致呈半圆形,距离坑顶边缘中部越近,位移量越大。最大位移量集中分布于卸荷裂隙发育的位置,尤其是卸荷裂隙尺寸最大的点位。

3.2.4 地震作用

由图 11 可见,各祭祀坑在地震作用工况下,Ⅷ级烈度时,水平振动在坑体四周均有响应,往往坑顶边缘振动速度较大,最大速度值主要分布于卸荷裂隙发育的位置。

综上可知,在上述附加静荷载和地震动荷载作用下,卸荷裂隙所在坑壁分别对应较大的水平位移和水平振动速度,尤其在裂隙开口宽度最大处更为明显。这说明,卸荷裂隙为坑体结构变形的薄弱位置,也是后期坑体结构稳定防控的重点。

4 讨论

4.1 坑体稳定性主要影响因素分析及建议

目前,土遗址保护领域关于动静荷载作用下,土体结构变形和振动响应未有统一阈值,主要参考土质边坡、基坑等工程相关标准规范。祭祀坑为地下开挖的土坑类考古遗址,其稳定性分析、监测、支护等属于典型基坑工程^[17-18]。参考 GB 50497—2019《建筑基坑工程监测技术标准》,基坑设计一级安全等级的围护墙(边坡)顶部水平位移监测预警值为 20~40 mm,相对值为 0.002~0.004 H (H 为基坑深度)。考虑到祭祀坑文物价值的重要性和破坏后果的严重性,将其安全等级认定为一级,偏保守地以 0.004 H 作为坑体最大水平位移阈值 $D_{\max}$ 。同时,参考国内外不可移动文物振动速度阈值的相关标准,德国标准(DIN 4150-1999)中对重要遗迹、古建筑和历史纪念性建筑物的爆破振动防护阈值设定为 3 mm/s,瑞士标准(SN 460312-1992)中对历史纪念性建筑物的环境振动阈值设定为 3~5 mm/s,中国《古建筑防工业振动技术规范》(GBT 50452—2008)中对古建筑砖石结构的承重结构最高处水平方向允许振动速度设定为 0.15~0.75 mm/s。石玉成等提

出土遗址容许振动速度建议值,即在环境或爆破振动方式下,最高处水平方向允许振动速度为 0.5~1 mm/s^[19]。考虑到祭祀坑的材料性能、形制结构、自振频率、抗震情况等与国内外相关标准中砖石结构建筑差异较大,而与现有土遗址案例较为接近,且不受振动高程放大效应的影响,因此以 1 mm/s 作为坑体最大振动速度阈值 $v_{\max}$ 。

将各祭祀坑在不同工况条件下最大水平位移或振动速度与上述阈值进行对比,结果如图 6 所示。由图 6 可见:①在分层开挖工况下,各祭祀坑最大水平位移均低于 $D_{\max}$,说明在没有人为干扰和地震影响的情况下,坑体能够保持自身稳定。这与祭祀坑前期由上至下分层开挖至接近坑底的过程中,未见卸荷裂隙发育的现象一致。祭祀坑后期开挖至坑底提取埋藏遗物的过程中,坑顶卸荷裂隙开始发育,说明考古现场设备堆载、人员踩踏等产生的附加荷载对坑体稳定性影响明显。②在设备堆载工况下,长边或短边距边缘小于 1.5 m 时,大多数祭祀坑最大水平位移高于 $D_{\max}$,而对角距边缘大于 0.5 m 时,各祭祀坑最大水平位移均低于 $D_{\max}$ 。建议考古发掘现场采用的重型文物吊装、包装、转运等设备时,优先放置于坑顶对角,控制 0.5 m 的安全距离,若放置于坑顶长边或短边,控制 1.5 m 的安全距离。③在人员踩踏工况下,长边距边缘小于 0.3 m 或短边距边缘小于 0.2 m,部分祭祀坑最大水平位移高于 $D_{\max}$ 。建议考古发掘现场工作的大量考古发掘、文物保护、数字化测绘、后勤保障等人员,若站立于坑顶,控制 0.3 m 的安全距离。④在地震作用工况下,Ⅵ级烈度时各祭祀坑最大水平振动速度接近 $v_{\max}$,高于Ⅵ级烈度则最大水平振动速度显著增大,远大于 $v_{\max}$ 。考虑到四川省强震频发的特点,针对地震这种不可抗力,建议坑体采取有效的支护措施。同时,K3、K6+K7、K8 在上述不利工况条件下的最大水平位移或振动速度往往大于相应阈值,最大位移量或速度值主要分布于坑顶长边缘中部,尤其是卸荷裂隙发育形成的相对孤立的土块位置,建议将其作为坑体结构稳定防控的重点对象。

4.2 坑体结构稳定的现场防控措施及效果

基于上述分析及建议,在考古发掘过程中,为了及时有效地对坑体进行防护,应采取主动预防和被动控制相协同的现场防控措施,其组织框架见图 12。一方面从预防角度,针对设备堆载、人

员踩踏等人为可控因素,利用日常管理进行必要的防范,减缓坑体结构变形的发展速度。主要措施包括:考古发掘现场采用的重型设备尽量放置于坑顶对角,距边缘控制 0.5 m 的安全距离;参与的工作人员优先站立于坑顶短边,距边缘控制 0.3 m 的安全距离。另一方面从控制角度,针对地震作用等自然不可抗力,采用临时支护结构进行一定的应对,减弱坑体结构变形破坏的后果。支护结构选择围护型内支撑方式,布置于坑体上部紧贴坑壁,通过可调节支撑杆件和挡板对抗体卸荷带临空面均匀施加预应力来控制结构变形的发展。对于自稳能力较好的祭祀坑(K4、K5),支撑杆件设置于坑壁两端[见图 13(a)];自稳能力较差的祭祀坑(K3、K6 + K7、K8),支撑杆件除设置于坑壁两端以外,还应在坑壁长边中部进行增设[见图 13(b)]。该结构较好地满足了考古发掘过程中操作空间不受限制、支护范围动态可调、安装操作快捷简便等要求^[20]。此外,对于部分宽大的卸荷裂隙,采用遗址土掺加一定比例天然水硬性石灰(NHL5)配置的浆液进行灌浆加固,避免裂隙两壁的土体长期失水收缩而继续扩展。

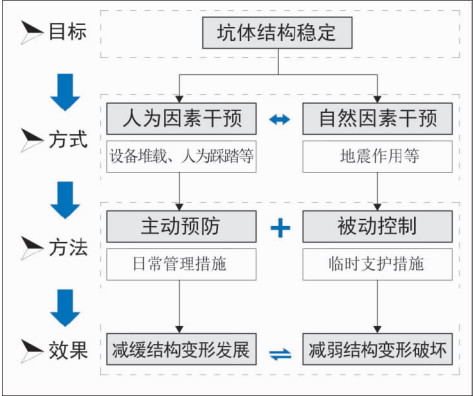


图 12 现场防控措施组织框架
Fig. 12 Organizational framework of on-site conservation and control measures

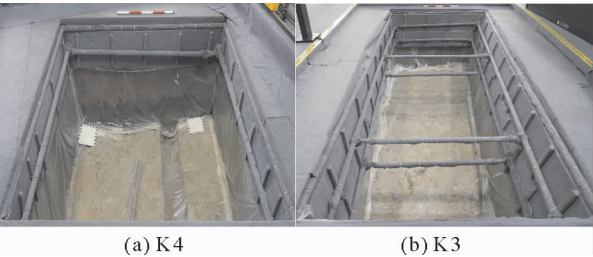


图 13 临时支护结构
Fig. 13 Temporary supporting structure
在考古发掘结束后,为了保证坑体结构的长

期稳定,不仅应定期调节支护结构的支撑杆件,避免其因预应力松弛导致防护效果减弱,而且要定期观察记录坑顶卸荷裂隙灌浆加固后的表面形态变化,从而间接监测其发育动态。研究发现,上述裂隙在灌浆加固后约 2 年时间内,裂隙内部浆材充填状态良好,与裂隙两壁之间未见分离现象(见图 14),这间接说明坑体结构变形发展得到了有效控制。

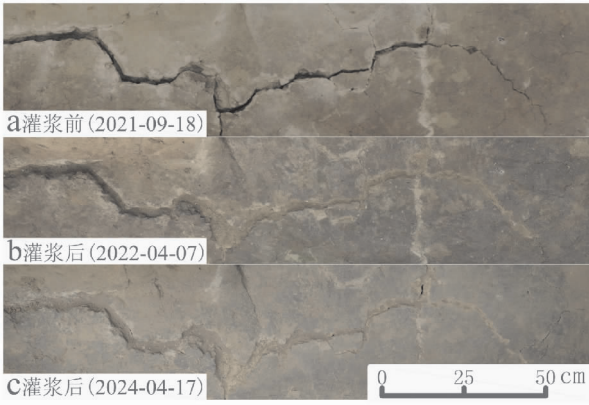


图 14 卸荷裂隙灌浆效果观测结果(K8 坑顶西侧)
Fig. 14 Observation results of grouting effect on unloading fracture

本次采取的现场防控措施具有临时性和应急性特点。建议后期在重要考古遗址现场保护中,针对类似问题,应在发掘前开展科学的稳定性分析,发掘中采取有效的变形监测和针对性的防控措施,发掘后进行长期的日常维护,从而最大程度地保证考古遗址的结构安全。

5 结论

- 1)三星堆遗址祭祀坑在设备堆载工况下长边或短边距边缘小于 1.5 m,人员踩踏工况下长边距边缘小于 0.3 m 或短边距边缘小于 0.2 m,地震作用工况下高于Ⅵ级烈度,其最大水平位移或振动速度高于相应阈值,为坑体结构稳定防控的不利工况条件。
- 2)在不利工况条件下,K3、K6 + K7、K8 最大水平位移或振动速度往往高于相应阈值,最大位移量或速度值主要分布于坑顶长边边缘中部,尤其卸荷裂隙发育的位置,为坑体结构稳定防控的重点对象。
- 3)采取主动预防和被动控制相协同的综合性防控措施:一方面利用日常管理对设备堆载、人

员踩踏等人为可控因素进行必要的防范,另一方面采用临时支护结构对地震作用等自然不可抗力进行一定的应对。实践证明,该方法有效控制了坑体结构变形的发展。

参考文献

- [1] 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 X D. Exploration of conservation philosophy for earthen sites in humid scenarios and an outlook on future conservation technology [J]. Dunhuang Research, 2013(1): 1-6.
- [2] 孙满利, 张景科. 文物保护学的理论探讨[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 192-198.
SUN M L, ZHANG J K. Theoretical discussion on conservation of cultural heritage[J]. Journal of Northwest University (Natural Sciences), 2022, 52(2): 192-198.
- [3] 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 M L, CHEN Y R, SHEN Y X. New progress and prospects in research on earthen site deterioration[J]. Dunhuang Research, 2022(2): 136-148.
- [4] 赵凡, 李思凡, 王冲, 等. 三星堆祭祀区考古遗址现场保护理念与方法[J]. 四川文物, 2024(6): 108-118.
ZHAO F, LI S F, WANG C, et al. Conservation concept and method of the archaeological excavation site in Sanxingdui sacrificial area[J]. Sichuan Cultural Relics, 2024(6): 108-118.
- [5] WANG X D, YU Z R, ZHANG J K, et al. Numerical simulation of the behaviors of test square for prehistoric earthen sites during archaeological excavation [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 567-578.
- [6] 王彦武, 铁铮, 裴强强, 等. 静荷载作用下掏蚀影响土遗址稳定性的数值分析[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(4): 216-221.
WANG Y W, TIE Z, PEI Q Q, et al. Numerical analysis of the influence of root erosion on the stability of earthen sites under static load[J]. Geotechnical Engineering Technique. 2021, 35(4): 216-221.
- [7] 淳庆, 潘建伍. 金陵大报恩寺地宫遗址保护技术研究[J]. 文物保护与考古科学, 2014, 26(4): 1-7.
CHUN Q, PAN J W. Research on conservation of the underground palace in Jinling Dabaoen Temple[J]. Science of Conservation and Archaeology, 2014, 26(4): 1-7.
- [8] 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 L K, WANG Q, DUAN X T, 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.
- [9] 姜枫, 郑程程, 黄志义, 等. 白口城遗址北城墙降雨及渗流下的稳定性模拟分析[J]. 中国科技论文, 2020, 15(8): 862-868.
JIANG F, ZHENG C C, HUANG Z Y, et al. Simulation analysis of the stability of the north wall in Baikou Ruins under rainfall and seepage[J]. China Sciencepaper, 2020, 15(8): 862-868.
- [10] 董梅, 郭青岭, 孔梦悦, 等. 考虑降雨入渗的良渚古城老虎岭遗址边坡稳定性分析[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 231-237.
DONG M, GUO Q L, KONG M Y, et al. Slope stability analysis of Laohuling Site in archaeological ruins of Liangzhu City considering real rainfall conditions[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 231-237.
- [11] 谌文武, 李鹏飞, 梁涛, 等. 苏巴什东寺佛塔的地震动动力响应[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(3): 373-378.
CHEN W W, LI P F, LIANG T, et al. Dynamic responses of east temple pagoda of Subashi Temple under seismic loads[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(3): 373-378.
- [12] 常鹏, 李强军, 马伯涛, 等. 汽车致虎门遗址振动影响数值分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(14): 48-53.
CHANG P, LI Q J, MA B T, et al. Numerical analysis on vibration response of Humen Site induced by moving vehicle load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 48-53.
- [13] 赵凡, 姚雪, 胡芮, 等. 三星堆祭祀区地表干缩开裂病害发育后期发展演化特征[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(5): 1025-1035.
ZHAO F, YAO X, HU R, et al. The late-stage developmental and evolutionary characteristics of surface desiccation cracking in sacrifice area of the Sanxingdui Site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(5): 1025-1035.
- [14] 陈昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1075-1082.
CHEN K, YAN S W, SUN L Q, et al. Analysis of deformation of deep foundation pit under excavation un-

loading condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1075-1082.

[15] 李守德,张土乔,王保田,等. 天然地基土在基坑开挖侧向卸载过程中的模量计算[J]. 土木工程学报, 2002,35(5): 70-74.

LI S D ZHANG T Q WANG B T, et al. Modulus formula for foundation soil under lateral unloading during excavation [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(5): 70-74.

[16] 邱滢玲,丁文其,赵腾腾,等. 单侧卸荷诱发深基坑的不对称性变形特性与机制[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 199-206.

QIU Y L, DING W Q, ZHAO T T, et al. Asymmetrical deformation characteristics and mechanisms of deep excavations induced by one-side unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 199-206.

[17] 王南,张景科,黄军朋,等. 潮湿环境史前考古土遗址模拟探方长期稳定性评价[J]. 敦煌研究,2018(4):124-130.

WANG N, ZHANG J K, HUANG J P, et al. Evaluation on the long-term stability of the simulated archaeological tests of pre-historic earthen sites in humid scenarios[J]. Dunhuang Research, 2018(4): 124-130.

[18] 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.

[19] 石玉成,郭青林,刘琨,等. 车辆振动对山丹明长城遗址的影响分析[J]. 地震工程与工程振动,2014, 34(S1):988-993.

SHI Y C, GUO Q L, LIU K, et al. Impacting analysis of vehicle vibration on ancient earthen sites of the Great Wall of Ming Dynasty in Shandan County[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(S1): 988-993.

[20] 赵凡,姚雪,谢振斌,等. 一种潮湿环境土坑类考古遗址临时支护结构:CN 219137704 U[P]. 2023-06-06.

(编辑 雷雁林)