



土遗址文物震害防御及抗震加固对策^①

石玉成^{1,2}, 王旭东³, 李舒⁴, 胡明清^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200; 4. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:概述了土遗址文物的主要病害如风蚀病害、表面风化、雨蚀病害、裂缝或坍塌、基础掏蚀、生物破坏以及人类社会经济活动所产生的不良影响等的特征及成因机制;阐明了建立土遗址文物防灾减灾综合体系的重要性,提出了灾前防御、震时应急和灾后恢复的对策;针对土遗址的特殊性提出了抗震防护加固的原则,分析了其特点,针对不同病害特征的土遗址分别提出了抗震加固方案。为土遗址文物的科学保护和综合防御地震灾害提供了理论基础和工程实践指导。

关键词:土遗址;灾害;震害防御;抗震加固

中图分类号: P315.943

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2013)01-0042-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0042

Seismic Hazard Prevention and Retrofitting of Soil Relics

SHI Yu-cheng^{1,2}, WANG Xu-dong³, LI Shu², HU Ming-qing^{1,2}, LIU Kun¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Key Laboratory of Loess Seismic Engineering of CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3. Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu 736200, China;

4. Civil Engineering, Dongnan University, Nanjing, Jiangsu 200091, China)

Abstract: Soil relics are historical structures built with soil, which have significant historic, artistic, and scientific value. The soil properties and technological innovations are associated and determine which soil relics are vulnerable to nature and human activities. Soil relics are in dire need of protection and seismic safety is of great importance. This paper surveys and evaluates typical soil relics along the silk road in China according to the damage caused by wind erosion, surface weathering, rain erosion, cracking or collapse, foundation settlement, biological erosion, and human activities. The importance of a comprehensive seismic hazard reduction approach for soil relics is emphasized and strategies for hazard prevention, emergency management, and rehabilitation methods for the preservation of soil relics are proposed. Based on the characteristics of the soil relics, the principles for seismic retrofitting, the key retrofitting requirements, and retrofitting design are established. The research results will serve as guidelines for the reduction of seismic risk for soil relics.

Key words: Soil relics; Disaster; Seismic hazard prevention; Seismic retrofitting

0 引言

土遗址主要指以土为主要建筑材料的建筑遗址

① 收稿日期: 2013-03-20; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013005

基金项目: 甘肃省科技支撑计划项目资助(0708NKCF089)

作者简介: 石玉成(1966—), 男(汉族), 山东人, 博士, 研究员, 主要从事地震工程研究。

或古代土木建筑在遭受破坏后残存的土质部分。甘肃敦煌玉门关及河仓城、汉长城和烽燧,瓜州的锁阳城遗址,山丹明长城,高台骆驼城,宁夏的西夏王陵,新疆吐鲁番的交河故城、高昌故城等即为典型的土遗址,它们充分展现了我国古代先民的创造力和民族精神,集中代表了我国传统文化的丰富内涵和发展的历史轨迹,具有不可替代的整体价值和地位。

在漫长的历史岁月中,土遗址文物经过千百年的风吹沙打,水泡雨淋,阳光曝晒,地震活动以及人类活动的破坏以后,产生了多种地质病害,如土体失稳、裂缝丛生、局部开裂、风化残破、崩塌掉块、基础掏蚀等。土遗址的各种地质病害,除了受长期风化影响造成其本身强度降低外,当地的区域地质和新构造运动是一个重要的因素。许多土遗址处于地质构造复杂、地震活动较频繁的地区,历史上曾多次遭到地震袭击,如交河故城、锁阳城、山丹长城和武威长城等都曾遭到地震的破坏,史书中均有明确记载。

文化遗址是不可再生的资源。目前我国的土遗址文物总体上正处于高危时期,由于缺乏科学的保护理念,技术手段相对滞后,力量薄弱,遭受严重威胁与破坏的趋势仍难以遏止;对土遗址文物保护事业发展战略研究不够,不能适应实际需求;尚未形成完整的多学科交叉的科学体系,研究成果较为零散,技术集成水平不高,缺乏必要的技术规范。作为政

府和决策部门,急需科研工作者提供土遗址文物方面的震害防御及抗震防护技术对策,并为潜在的地震灾害做好科学的应急方案。

1 土遗址的主要病害及成因机制

许多文物保护工作者从不同的角度对土遗址的病害特征进行了研究^[1-7],本文通过对西北地区典型土遗址的考察分析,归纳总结土遗址的主要病害有:风蚀病害、表面风化、雨蚀病害、裂缝、失稳或坍塌、基础掏蚀、生物破坏和人为破坏等问题。

1.1 风蚀病害

风蚀(图1)是最主要的破坏形式。典型的风蚀地貌有三种:蜂窝状、层状、棒槌墙。本地区的大量土遗址地处荒漠戈壁腹地,气候极端干旱,降水量少,温差大,地表普遍为沙丘所覆盖,沙源丰富。同时该区又是多风地区,风力强且具突发性,输沙力高,风沙流的强烈风蚀和剥蚀是风沙灾害的主要成因。在风沙的磨蚀与旋蚀作用下,胶结差的地层容易被风吹蚀,形成典型的风蚀病害。蜂窝状即墙面被风吹蚀成凹凸不平的蜂窝状;层状风蚀病害主要发生在生土地层。长期的风蚀造成了土遗址形状千姿百态,其形状和残留高度对其稳定性有很大影响,尤其是细长结构的土遗址,对地震加速度有明显的放大作用,极易遭受破坏。



(a) 瓜州锁阳城外城墙



(b) 敦煌河仓城

图1 典型的土遗址风蚀病害

Fig. 1 Typical wind erosion of ancient soil relics.

1.2 表面风化

表面风化是土遗址普遍发育的一种病害,风化破坏营力主要为风、雨、温度、湿度的急剧变化以及盐分的运移和毛细作用。岩性特征是土遗址文物产

生多种病害的物质基础,是内因。土遗址的主要构成是粉土、粉质粘土和砂土,可溶盐含量较高,风化病害尤为严重。土遗址墙体的土中含有较多的方解石,由于方解石是一种耐冻融很差的矿物,当遭到反

复冻融后,易产生风化。主要病害表现形式为片状剥离、龟裂、块状剥落、空鼓等(图2)。



图2 瓜州破城子遗址表面风化严重

Fig. 2 Severe surface erosion of Pochengzi ancient city in Guazhou, Gansu province.

1.3 雨蚀病害

在西北地区,虽然干旱少雨,但降雨时空分配不均匀,偶然的暴雨对土遗址破坏极大。像40~50 mm的降雨也经常发生,在长期的历史环境中这种破坏是不可低估的。雨蚀主要有三种情况:墙面片状剥离、低洼区浸水、冲沟(图3)。墙面片状剥离是在暴雨作用下土体崩解成泥流附着在墙体上,形成泥皮,在风或重力的作用下不断以各种形式的片状和块状脱落,后期形成凹凸不平的蜂窝状墙面。墙体遭侵蚀的病害状况发生普遍,往往以迎风面的墙体或处在低洼处的墙体受损最为严重。



图3 武威长城烽火台受雨蚀形成冲沟

Fig. 3 Rain erosion on Watch tower of Great Wall in Wuwei, Gansu province.

1.4 裂缝、失稳或坍塌

土遗址体中不同成因类型的地质不连续面的发育程度、产状、组合形态是导致土遗址产生病害的一个重要因素。裂缝是由于应力的重分布,局部应力集中或产生张应力,当应力超过土体强度时土体发

生破坏,引起土遗址开裂变形。土遗址中也保存有大量的洞室,有在生土中挖成,有在夯土中挖成,有土坯砌筑。由于长期的自然风化作用,在地震和重



图4 吐鲁番交河故城遗址裂缝和坍塌病害

Fig. 4 Crack and collapse on Jiaohe ancient city in Tulumfan, Xinjiang.

力作用下产生变形,形成裂隙,将整个顶部分割成数块,最后随着裂隙进一步发育,形成坍塌(图4)。地震活动对土遗址的影响非常突出,2003年10月25日发生在甘肃山丹、民乐之间的6.1级地震使山丹县境内的明长城3处城墙墙体、2处烽燧发生倒塌(图5),另有数十处城墙墙体产生裂缝和倾斜。



图5 山丹长城遭地震破坏倒塌

Fig. 5 Great Wall damaged by earthquake in Shandan, Gansu.

1.5 基础掏蚀

基础的掏蚀是由多方面因素引起的,主要是风蚀、水蚀、以及化学腐蚀共同作用。首先因为作为建造材料的黄土土体中含有较多的易溶盐成分,如 Na_2SO_4 、 MgSO_4 、 NaCl 等,由于雨水的冲刷、地面积水,使得土体中的易溶盐成分随着水流迁移富集于墙基础处,造成墙体与地面接触部分的土体的不断疏松,力学强度下降。特别是可溶盐成分在雨期发生溶解—结晶—复溶解这一反复过程,使墙体强烈

收缩,并沿夯层逐步剥离凹进,加上风沙的搬运作用,基础逐渐被蚀空,使整个墙体处于不稳定状态。

有的土遗址在风的作用下底部不断掏蚀收缩,像即将倾倒的“棒槌”(图6)。



(a) 骆驼城墙体



(b) 高昌故城

图6 典型基础掏蚀病害

Fig. 6 Typical base erosion of ancient soil relics.

1.6 生物破坏

生物破坏是指由于生物作用对土遗址造成的破坏,包括动物病害和植物病害。动物病害是指一些虫洞、鼠洞、鸟巢、鸟类粪便等动物作用造成的病害。植物病害是指植物生长过程中,延伸在土遗址中的根系所造成的破坏作用引起的病害,如在锁阳城墙体上和墙体两侧长有红柳、骆驼刺等植物,这些沙生植物发达的根系对墙体结构带来破坏。另外,霉菌在生长过程中分泌了酸性物质,改变了土遗址表面的颜色状态,破坏了土壤的表面结构(图7)。



图7 骆驼城土遗址表层霉菌

Fig. 7 Mold growth on wall surface of Luotuo ancient city.

1.7 人为灾害

西北地区的土遗址由于当时人口较少,交通不便,故人为的环境污染相对较少,为土遗址文物的长期保存提供了有利条件。但是随着近些年旅游业的

蓬勃发展和人类在从事各种社会经济活动中的短视行为,在相当程度上改变了土遗址原有的自然环境,加剧了土遗址已有的病害,并诱发了新的灾种。爆破振动、机械振动、火车和汽车等所导致的环境振动,使土遗址文物长期处于动力环境中,导致土体裂隙结构面强度缓慢削弱,助长了危岩块体的形成和崩落。人类生活和生产活动过程中对土遗址的拆毁、盗掘、取土,已使不少土遗址面目全非或不复存在,如挖墙造田、为穿行方便挖墙开路(图8)、人为攀爬以及点火取暖等,都会对土遗址产生巨大的影响。又如在锁阳城,多处地段存在当地村民挖掘锁阳等药材留下的坑,距离遗址墙体很近,严重影响土遗址的保存。

同时,人们为了土遗址保护和文物修复所进行的一系列工程活动和尝试,客观上会产生一些次生灾害或使病害加剧。如:个别土遗址文物采取的加固修缮工程,改变了原貌,损害了文物的艺术价值;土体的补强和加固、表面的防风化处理以及排水防渗系统的整修等工程活动,由于决策失误,不仅可能起不到应有的作用,相反会给以后的工程措施带来极大的困难。

2 土遗址文物震害防御对策

土遗址文物保护的实质就是探讨土遗址文物与自然环境、文化环境、管理机构、服务设施、旅游者等方面的相互协调和统一,最大限度地保护和延长其天然工作寿命。其震害防御应加强灾前综合防御、



图8 山丹明长城中的人为通道

Fig. 8 Excavation by human on Great Wall built during Ming dynasty in Shandan, Gansu.

震时科学应急和灾后恢复对策的编制工作。

2.1 灾前防御对策

灾前防御是防灾减灾中最重要的阶段,是减轻灾害损失的根本性保障,要立足于从体制和机制上完善防灾减灾综合防御体系。

(1) 实施科学调查评估行动,科学编制文物保护和防灾规划

通过一系列保护规划专项研究,遵照“抢救第一、保护为主、加强管理、合理利用”的文物工作方针,做好土遗址环境地质条件的调查、勘测和评价工作;深入开展土遗址地震稳定性研究;进一步研究各种人文因素在灾害形成中起作用的方式和途径,研究各种人文因素对土遗址病害的影响程度、方式和途径;大力加强保存与修复的基础科学研究。

(2) 加强对土遗址文物保护相关政策的研究以及防灾减灾法规体系建设

目前土遗址退化严重,必须采取措施控制经济发展对遗址的负面影响,在保护和利用之间取得平衡,确保遗产保护与管理的必需条件及资源。同时,应加大文物防灾减灾法律法规体系建设,从灾害预防、宣传教育、监测预警、应急管理、灾后修复、保障体系等方面进行必要的法规约束,规范文物保护行为。

(3) 实施监测及安全预警相关技术行动,提升安全防范能力

对自然变异的监测减灾是先导性措施。应逐步建立和完善土遗址地质灾害的动态监测设施和环境质量监督监测体系。加强对表面风化、裂隙发育、现有加固手段的作用和自身位移的长期监测工作;对于环境振动对土遗址文物的影响也要进行必要的监测。同时文物主管部门应加强相关工作人员的地震

应急培训工作,学习和掌握一定的地震应急安全知识,增强应急处理能力。

(4) 加强土遗址文物灾害风险评估和文化遗产保护的标准化建设

建立以领导和有关专家为核心的防灾减灾决策系统,加强对病害整治方案的技术可行性、经济合理性、实施可能性等方面的多学科、多部门的专家联合论证工作。注意各种病害成因之间的相互联系和相互作用,提高防灾减灾的可靠性和科学性。建立土遗址文物保护工程前期勘测的技术标准,室内和现场测试技术规范及工程稳定性评价的方法及标准,为土遗址文物保护工程规范化的操作提供一个可以参照的定量标准。

(5) 科学编制地震应急预案

为预防、及时处理和解决土遗址文物所在地发生地震时的各种问题,必须编制应急预案。应急预案的内容可按照《国家文物局突发事件应急工作管理办法》中的规定确定。深入而细致的应急预案是使地震的破坏程度和灾后影响最小化的关键条件。应当考虑的不止包括地震发生当时的行动方案,还需要策划对各种遗存的保护方法和必需的条件,并确保当时能够得到这些条件。

(6) 重视土遗址文物环境的保护

文物环境包括自然环境和人文环境两部分。文物所在的自然环境是文物赖以生存的基本条件、是文物的载体;而人文环境是文物遗址不可缺少的组成部分。近年来,由于文物自然环境质量的急剧恶化,加剧文物的劣化速度,甚至对文物造成毁坏的例子屡见不鲜。因此,要想很好地实现保护土遗址遗存及其历史环境的完整性,保存土遗址遗存的真实性以及保持土遗址遗存的延续性,应密切注意文物周围的环境质量,切实重视文物环境的保护。

2.2 震时应急对策

地震发生后的短暂时间内土遗址文物的防治研究分为三个时间段:

(1) 主震刚刚发生的短暂时段。在这个时段,文物管理部门第一时间启动紧急预案、召开现场会议,安排部署开展文物抢救工作和自救工作,并及时将文物受灾情况上报上级主管部门,同时要立即停止向公众开放。古建维修、文物保护、岩土工程等相关专业的专家赶赴受灾现场进行实地考察评估和临时紧急处置,尽一切可能采取补救措施保护文物,并及时向社会公众发布信息。

(2) 主震发生后文物有限的临时救治状态下的

时段。在这个时段,遭受重创的文物仍岌岌可危,依然面临着不断发生的余震、各种次生灾害和人为的威胁。受灾地区各级文物保护单位要在受损文物周边设置警戒线和说明牌,划定现场保护范围,避免因文物建筑垮塌或构件掉落威胁人身安全;做好文物受灾现场原址清理、散落构件收集、保管和相关资料的收录、整理工作,防止文物建筑构件遗失;对受损特别严重,结构存在安全隐患的文物建筑,应立即采取临时性支护措施。

(3)指文物在经过抢险加固之后的时段。震后文物虽经过了抢险加固,但其结构体系仍处于被破坏的状态中,相当部分受损结构体不能正常发挥其功能,结构的稳定靠在抢险加固阶段所附加的支撑、加固物来实现,文物在整体上是病态的,且这种病态会随着时间的延续而继续发展。处于这种状态下的文物,其生命时段会大大缩短,应加强应急值班和信息报送工作。对于险情极其严重的文物建筑,要按照抢救第一的原则,抓紧组织实施排险工作,确保文物安全。

2.3 灾后恢复对策

灾后文化遗产保护,是满足灾区人民精神文化需求、情感需求、鼓舞重建家园信心的重要举措,是共同守护精神家园、传承中华文明的重要行动。文化遗产保护,特别是在地震中遭受损毁的文物建筑的抢救、保护、修复是一项科学工作,必须根据其价值、相关的历史资料、地震前文物的状况、结构特征、环境要素以及修复之后的功能,遵循中国文物古迹保护工作的程序,确保抢救、修复工作能够保护修复对象的价值,保护其真实性、完整性,并实现它在震后社会重建中的功能。

(1)尽快启动对土遗址文物震害的科学评估和修缮方案的制定一支强大的专业队伍,有效的管理、评估机制是保证震后文物抢救、修复顺利进行的基本条件。尽快成立由相关专家和管理人员组成的工作组,展开对土遗址文物受损情况的评估,制定修缮方案。应尽快开展勘察设计,确定抢救保护项目,编制工程技术方案,尽可能早地对其进行全面修复,根除其病害,并早日实现对社会公众开放。

(2)根据实际情况可适当保留地震记忆

地震造成的古代建筑物受损,是建筑物本身历史的一种延续,从而也会产生一种新的遗产概念——地震遗产。汶川地震北川地震遗址博物馆即为典型实例。再比如,柬埔寨吴哥的很多寺庙建筑都已成为著名的遗址,其历久产生的历史和美学价值已

成为不可取代的人类文化遗产。如巴戎寺,其石头、大树、倒塌的形态已成为一种超乎仅仅建筑意义的不朽的艺术品。

(3) 编制灾后文物抢救、修复规划

地震后的重建时期,要充分利用重建契机,在对文物受灾情况进行统计和评估的基础上,制定灾后文物抢救保护修复规划大纲,编制恢复重建经费预算,及时纳入国家灾后重建规划,为文物抗灾工作奠定坚强的法律、经济基础,是受灾区域文物管理部门灾后首先要做的重要战略部署。文物管理部门要将制定文物抢险保护方案设计的工作放在首位,同时也应将受灾文物保护单位保护规划的制定工作放在同等重要位置来抓,从而优化文物的生存环境。

(4) 积极开展国际合作和地震对策研讨

汶川“5·12”特大地震使包括土遗址在内的大批珍贵文物遭受了重创,国际社会给予广泛关注。震后国家文物局召开了一系列学术研讨会,在文化遗产抢救和保护方面取得了有关国家以及国际组织和机构对我国的震后文化遗产抢救和修复的支持,促进了保护技术的交流,提高了震后文物抢救、修复的水平和从业人员的文物防震减灾技术,值得借鉴和发扬。

3 土遗址文物的抗震加固

3.1 抗震加固的原则

鉴于土遗址文物的特殊性,其抗震加固应实现与文物保护的有机结合,应遵循以下原则。

(1)文物保护治理应遵循“不改变文物原貌、修旧如旧”的原则。尽量不改变土遗址原有的赋存面貌,把保护的重点放在预防土遗址自然环境遭受破坏或恶化的方面上,加强对环境的综合治理;对暴露在外的工程设施要进行隐蔽处理,力求自然和谐,以达到“修旧如旧”、尽量保持原貌的目的。

(2)适当提高地震设防烈度和注意考虑地震影响方式的原则。土遗址和文物加固工程属永久性工程,故设计时应适当提高地震烈度进行设防,特别是对国家重点文物保护单位,设计时都应将地震烈度提高一度进行设防。

远距离地震波具有长周期,低频率,持续时间长的特征;而近距离地震波具有短周期,高频率,持续时间短的特征。土遗址的抗震防灾不但要重视近震对土遗址的影响,区域远震活动的影响更不容忽视。

大部分土遗址为残存的薄墙体或不规则的细高结构,自振周期偏长,对地震加速度有明显的放大作

用,不利于土遗址的抗震稳定性。所以在土遗址及其附属建筑物加固过程中应考虑其不规则形状的不利影响。

(3) 充分考虑土遗址结构本体与地基以及周围环境的共同作用。必要的地基处理加固与周围环境的综合整治是土遗址本体加固的基础。

(4) 根据各处土遗址的保护等级与文物价值重要性,确定安全、可靠且符合经济承受能力的加固方案。结合加固效果,加固工期,施工的便利性,施工过程中对土遗址本体的不利影响等因素,综合判断选择加固方式。

(5) 在许多情况下,土遗址的修复保护不可能一次加固,一劳永逸,应留予充分的空间,遵循“可再处理”原则,为未来的多次加固提供便利^[8]。

(6) 考虑到土遗址文物的不可再生性,加固工程实施前应开展类比试验,以检验设计方案的可行性,并进行必要的调整。同时,加固材料和工艺应进行科学检测和现场测试证明对文物无害且对保护长久有效后方能使用,确保不损害文物的艺术价值。

(7) 保障游客安全的原则。土遗址区是众多游人参观游览的场所。游客的安全保障是土遗址文物区运营管理的首要目标。避免地质灾害对游客的危害,保证游人生命 safety 是土遗址防治的重点,在治理方案中应予考虑。

3.2 抗震加固方式

3.2.1 土遗址的抗震加固与一般加固的比较

对于带有病害的土遗址,对其进行修复加固,还原其原有的相貌,保存其历史价值和文化价值,使之与更久远的传承,这是十分必要的,也是迫在眉睫、亟需解决的问题。同时土遗址的保护加固也是一个世界性的难题,实施难度大,也往往缺乏持久性。

(1) 抗震加固与一般加固的共同之处

一是目标相同,两种加固方式的最终目标均是对土遗址的病害加以控制,从而使之处于更长时间的安全赋存状态。二是加固原理基本相同。土遗址加固的方法一般基于以下一种,或多种原理。其可以原理基本分为①致密;②排水;③胶结;④复合散体;⑤拌合;⑥吸热或加热;⑦控制变形^[9]。最终解决表面风化和整体稳定两方面重要问题。

(2) 抗震加固与一般加固的区别之处

一是加固对象的不同。对于一般加固而言,所有带有病害的土遗址,包括风化严重、水蚀严重或裂隙发育等病害,都是一般加固的对象;而土遗址的抗震加固对象主要是针对于病害严重如大面积坍塌,

基础蚀空,稳定性差,在地震作用或自重作用下,极易发生倒塌的高危险性土遗址。

二是加固效果的不同。土遗址的一般加固针对于修复土遗址的各种病害,对“修旧如旧”原则要求较高,并充分考虑未来一切可能环境作用下土遗址可以更好的保存。而土遗址的抗震加固建立在一般加固方式的基础之上,偏重于考虑土遗址在遭遇突发荷载下的安全情况,力求损坏达到最小,因此对加固要求更高,对“抢救第一”的原则要求更高。

三是加固手段的不同。由于土遗址在不同情况下的受到的破坏程度不同,有剧变的,有缓变的。此外,在不同的荷载作用下,土遗址的失效路径、方式和规模也是截然不同的。如:土遗址在风蚀、水蚀作用下,其构筑材料的力学性质会下降,部分土体会被蚕食,当发展到一定程度后,才发生失稳;而当地震来临时,土遗址会因惯性力的存在,造成土体地震响应过大,内部产生较大的应力、应变或位移,从而发生破坏,或由于土遗址间的碰撞挤压造成破坏。因此,土遗址的一般加固通常以化学加固方式为主;而抗震加固通常以物理加固或物理加固与化学加固相结合的方式。

3.2.2 土遗址的抗震加固方式

针对西北地区土遗址的病害特征和赋存环境的实际背景,结合土遗址的一般性加固理论和经验,从加固部位上分,可以将土遗址的抗震加固方式分为结构加固和基础加固;从加固目标上分可分为临时加固与永久加固;从加固材料上分可分为土体加固和复合材料加固;从加固程度上分可分为表面加固与内部加固;从加固流程上分可分为一次加固或多次加固。一般的,为达到较好的抗震加固效果,可将土遗址的加固方式分为物理加固和化学加固以及化学物理加固三大块,并进行相对的独立研究或综合研究。在实际加固过程中,往往是联合这两种加固方式,采用物理化学加固方式来实现最优化加固。

(1) 物理加固

物理加固指通过物理的机械性加固方式,旨在改变其土体的内部应力应变状态,调整其整体连接性或刚度等特征,藉此获得较好的稳定性,尽量避免病害部位或结构薄弱区域在地震作用下发生破坏。常见的物理加固方式有:土坯衬砌、卵砾石培筑、支架托护、土钉锚固、地基托换、挡土墙加固、复合锚杆加固等。

(2) 化学加固

化学加固指通过利用化学溶液的加固方式,旨

在改变其土体材料的化学特性或物理力学特征,调整包括表面密实度、土颗粒间微观联结方式、增加砌补层与原遗址的结合力等增强土遗址的抗风化、抗水蚀、抗振动能力。常见的化学加固方式有:PS 表面渗透加固、偏氟聚物加固、灌封胶灌缝、喷涂杀虫、除草剂等。

(3) 化学物理加固

化学物理加固指结合物理加固和化学加固两种方式,旨在结合前两种加固方式的优势,兼顾土体的力学性质和化学成分调整,藉此获得最优的加固效果。其中岩土注浆和岩土锚固是较为成熟的化学物理方法。岩土注浆包括水泥注浆材料的发展与应用、化学注浆材料的发展和应用、高压旋喷注浆技术、特殊注浆技术(如粉喷加固技术、树根桩加固技术)等;岩土锚固技术结合新材料灌浆液,有许多种,如预应力锚索、预加固技术、化学锚固技术等。

针对土遗址的病害种类、结构类型繁多的情况,特提出一些根据不同病害特征的抗震加固方案,如

表 1 所示,以供参考。

综合对比分析土遗址的抗震安全性和对土遗址加固效果的实际测试表明^[10],认为对于带有病害的土遗址而言,综合砌补、灌浆与锚杆加固是一种较优方案。同时,通过对锚杆在土遗址文物加固中的作用的分析,认为锚杆加固具有良好的变形适应性和施工的灵活性,可以随时根据土体地质条件的变化,方便地调整锚杆的类型和布设参数,在土遗址文物加固工程中可以做到修旧如旧,较好地保持原来的自然和人文景观。从提高抗震性能的角度,锚杆直接加固用于增强相对独立部分的联结能力,增强其整体性;减小因刚度不一致发生碰撞的可能以及减小其顶点加速度反应。基础或下部结构凹进采用土坯砌补。中间裂隙剖切较深处采用砌补和注浆再与锚杆加固相结合的方式,以此增强加固材料与原材料的连接性,调整内部应力分布,减少应力集中区域,转移原病害遗址的危险部位。

表 1 不同病害特征的土遗址采取的抗震加固方案

病害类型	土坯砌补	锚杆锚固	地基托换	PS 材料灌浆	PS 材料渗透压注	表面喷涂	支架托护	挡土墙支撑	小土钉锚固
较小裂隙				●	●	●			●
较大裂隙	●	●		●	●				
部分缺失	●	●					●		
表面风化					●	●			
基础掏蚀	●	●		●				●	
不均匀沉降		●	●					●	
崖体		●						●	
洞穴冲洞	●	●		●		●	●		●
冲沟	●			●		●			●

注:●表示可选的加固方法

4 结语

土遗址文物震害特征及其防护研究同工程实践相结合,是今后面临的重要课题和发展趋势。土遗址文物的防灾减灾研究是一项多学科交叉的综合性课题,一方面既要认识到各类自然灾害的危害性,同时也要注意各种人文因素在相当广泛的范围内参与了灾害的形成;另一方面也要充分意识到文物病害的防治是一项系统工程,需要将科技进步、政府职能和民众参与三者很好地结合起来,才能达到防灾减灾的目的。目前文物保护部门和工程界迫切要求有关部门能够提供土遗址地震灾害的定量预测研究成果和抗震防护技术措施,以便能够指导土遗址文物的抗震防灾工作。本文建立了土遗址文物防震减灾体系的框架,对土遗址的综合防御震害具有一定

的借鉴作用。但由于我国的土遗址类型多且很复杂,土遗址抗震加固防护工作任重而道远。今后应加强对各种加固方式的作用机理和效能研究,进而指导加固设计和施工。同时鉴于目前还没有一种非常理想的加固与保护材料广泛应用于土质文物的保护,开发新型加固材料,提高抗震能力并保持加固效果的持久性,也极具现实意义。

[参考文献]

[1] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京:科学出版社,2003.
LI Zui-xiong. Conservation of ancient sites on the silk road [M]. Beijing: Science Press, 2003.

[2] 黄克忠. 岩土文物建筑的保护[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998:111.
HUANG Ke-zhong. The conservation of rock and earth structure sites[M]. Beijing: China Architecture and Building Press.

- 1998;111.
- [3] 李最雄,赵林毅,孙满利. 中国丝绸之路土遗址的病害及 PS 加固[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(5):1047-1054.
LI Zui-xiong, ZHAO Lin-yi, SUN Man-li. Deterioration of earthen sites and consolidation with PS material along silk road of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5):1047-1054.
- [4] 王旭东. 中国干旱环境中土遗址保护关键技术研究新进展[J]. 敦煌研究,2008,(6):6-12.
WANG Xu-dong. New progress in the research of key technologies of the earthen architecture site in the arid region of China [J]. Dunhuang Research, 2008, (6):6-12.
- [5] 孙满利. 土遗址保护研究现状与进展[J]. 文物保护与考古科学,2007,19(4):64-70.
SUN Man-li. Research status and development of the conservation of earthen sites[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2007, 19(4):64-70.
- [6] 石玉成,李舒,刘琨. 地震作用下骆驼城土遗址的安全性评价[J]. 西北地震学报,2011,33(3):255-260.
SHI Yu-cheng, LI Shu, LIU Kun. Safety Evaluation of the Camel Town Soil Relics under Earthquake Action[J], North-western Seismological Journal, 2011, 33(3):255-260.
- [7] 石玉成,秋仁东,孙军杰,等. 地震作用下预应力锚索加固危岩体的动力响应分析[J]. 岩土力学,2011,32(4):1157-1162.
SHI Yu-cheng, QIU Ren-dong, SUN Jun-jie, et al. Analysis of dynamic response of dangerous rock mass reinforced by prestressed anchor cables under seismic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4):1157-1162.
- [8] 柴新军,钱七虎,杨泽平,等. 点滴化学注浆技术加固土遗址工程实例[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(Supp. 1):2980-2985.
CHAI Xin-jun, QIAN Qi-hu, YANG Ze-ping, et al. Case study of drip injection of chemical grouts in earthen ruins reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp. 1):2980-2985.
- [9] 赵明霞. 浅谈土遗址加固保护的措施[J]. 山西建筑,2008, 34(8):144-145.
ZHAO Ming-xia. On reinforcement and conservation measures of earthen archaeological site[J]. Shangxi Architecture, 2008, 34(8):144-145.
- [10] Yu-cheng SHI, Ai-guo WANG, Reng-dong QIU. Evaluation of reinforcement effects for earth cliff of Jiaohu ancient city [A]// Advances in Industrial and Civil Engineering (Part 2) [G]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2012:1054-1060.