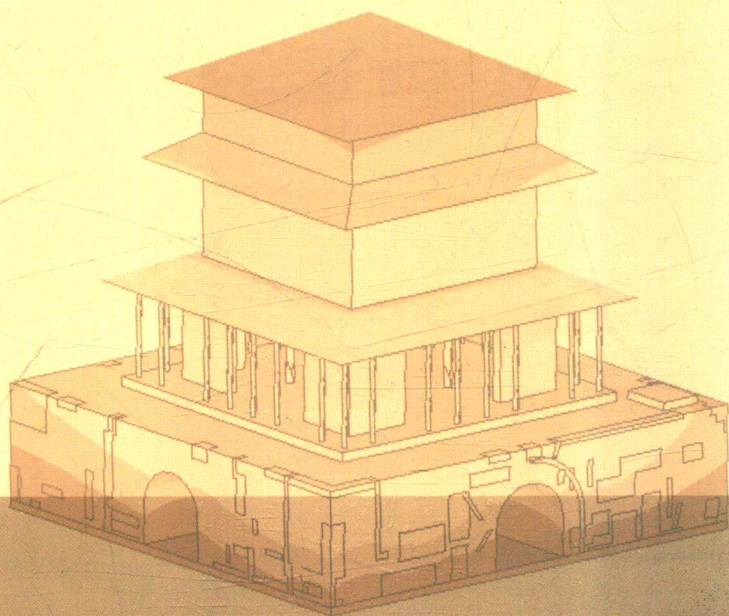


砖-土古建筑基座 病害机理及控制

朱才辉 李宁 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

砖-土古建筑基座 病害机理及控制

朱才辉 李宁 著

RFID



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书注重理论与实践相结合,根据古建筑、古遗址保护工程中实际存在的病害问题,采取理论分析、系统调研、原位监测、室内试验、模型试验和数值分析等手段来探索古建筑、古遗址病害特征及发展规律,提出了砖-土结构古建筑基座安全性的评估方法、变形控制标准和改性夯土的修复理念,旨在阐述系统科学的文物保护理念,提高研究者、工程师及文物管理部门对砖-土古建筑结构病害的深刻认识。全书共分5章,内容包括绪论、在役古建筑病害特征及砖-土材料力学特性研究、钟楼基座渗漏病害特征及模型试验研究、砖-土结构劣化及人为破坏对古建筑基座稳定性影响研究、地铁盾构施工对砖-土古建筑基座影响及控制措施研究。

本书可供土木建筑、岩土工程、城市地下空间工程等有关专业的本科生、研究生、科研设计人员及文物管理和保护部门参考。

图书在版编目(CIP)数据

砖-土古建筑基座病害机理及控制 / 朱才辉, 李宁
著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 12
ISBN 978-7-5170-7256-0

I. ①朱… II. ①朱… ②李… III. ①古建筑—基础
(建筑)—病害—研究 IV. ①TU-87

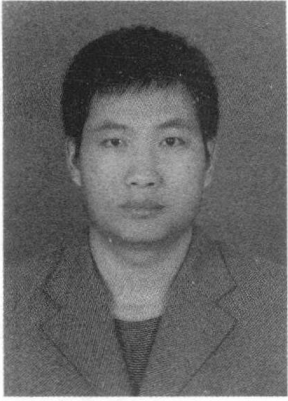
中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第298015号

书 名	砖-土古建筑基座病害机理及控制
作 者	ZHUAN-TU GUJIANZHU JIZUO BINGHAI JILI JI KONGZHI 朱才辉 李 宁 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京合众伟业印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.25印张 243千字
版 次	2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

作者简介



朱才辉(1983年2月),汉族,陕西商南人。2012年博士毕业于西安理工大学岩土工程专业。之后于2012年4月在西安理工大学土木建筑工程学院岩土工程研究所从事科研与教学工作。研究工作涉及古建筑、古遗址保护工程,黄土力学与工程,地铁工程,高填方地基工程等教学和科研工作领域。主持与本专著相关的国家基金项目2项(51678484、51308456)、主持陕西省科技计划资助项目2项(2015JM5175、2013JQ7022),主持陕西省黄土力学与工程重点实验室基金项目1项(16JS073),主持陕西省博士后基金1项(2014),参与国家支撑计划子课题1项,主持和参与横向课题10余项;发表SCI/EI检索论文30余篇,申报获批专利/软著4项,出版专著1部。



李宁(1959年11月),汉族,陕西西安人。1982年1月于西北农业大学水利系本科毕业,获学士学位;1982年1月—1984年12月在陕西机械学院水利系攻读硕士研究生;1989年3月—1992年2月,在奥地利Innsbruck大学攻读博士研究生。2000年5月任西安理工大学水电学院岩土工程研究所所长,2000年5月起任陕西省黄土力学与工程重点实验室主任,2006年7月起任西安理工大学水电学院党委书记,兼任中国岩石力学与工程学会常务理事、中国岩石力学与工程学会地面工程专委会副主任、陕西省岩石力学与工程学会理事长等。主要研究方向为岩石力学与工程、冻土力学与工程。主要从事岩体动力学特性的试验研究与裂隙动力学数值仿真模型分析、寒区冻土力学与工程研究的教学和科研工作。发表学术论文200余篇,出版专著《Structure Dynamics - Recent Advance》《Wave Propagation Problems in the Jointed Rock Mass》《桩基础设计指南》《边坡工程——理论与实践最新发展》《岩土工程化学》5部。获全国性的奖励2项,获省部级奖4项。

前言

明清时代的古建筑基座多为砖-土结构，根据近年来针对西安的钟楼和明城墙（分别于1568年、1781年和1983年进行了3次大规模整修）、榆林卫城古城墙（仅有部分整修，其余部分修复仍在规划中）等病害的调查资料显示，由于大气环境、地下水环境、临近人居和建筑环境、土壤环境等恶化，如水力冲刷侵蚀、生物化学腐蚀、植物根劈作用、水分入渗、芯墙夯土软化、地下水微循环变化或污染、地面交通尾气污染、地下临近开挖或地裂缝扩展等诱发了地基再固结和不均匀沉陷、地铁或地面交通振动、人为挖掘破坏、年久失修开裂或坍塌等问题，这些均是由城市化建设及生态环境发生变化引起的，长此以往将导致古建筑砖-土结构自身强度或承载能力逐渐减弱乃至丧失，从而对古建筑结构产生不可逆转的破坏，这些破坏已经对古建筑的安全性态和美观产生了巨大的负面效应，长远来讲也将会影响一个城市的政治、经济、历史、文化和教育生态。因此，为了有效保护古建筑，针对古建筑病害机理进行深入研究迫在眉睫。

本书以西安钟楼和城墙、榆林卫城为例，对其病害进行了系统的调查和原位监测，开展了系列的模型试验、室内试验，研究其水害、结构病害的形成机制，阐述其孕灾机理，对古建筑基座的安全性态进行评估，并提出相应的修复措施和变形控制标准。全书分为5章，绪论部分为李宁教授编写，其余部分为朱才辉编写完成。主要基于现场大量调研数据、原位监测试验、室内试验、模型试验、数值模拟等手段研究古建筑砖-土基座复杂系统的病害规律，希望通过本书的研究，为古建筑病害的防治、保护措施提供科学的参考。

本书得到国家自然科学基金面上项目“‘土-水’环境劣化下古建筑砖土结构破坏孕灾机理研究”（编号：51678484）及陕西省黄土力学与工程重点实验室基金项目“‘水-土’环境恶化对古建筑影响及其防护技术研究”（编号：16JS073）的资助，在此表示诚挚的感谢。

本书在资料收集过程中得到了陕西省文物局、西安市钟鼓楼保管所、北京工业大学建筑勘察设计院、榆林文化旅游产业投资有限公司、机械工业勘察设计院有限

公司等诸多单位和领导的大力支持。本书编写过程中，还得到了中国文化遗产研究院资深文保专家侯卫东教授、西安理工大学李宁教授提出的宝贵建议和意见，并参考和引用了本书文献中所列的图书和资料，在此对相关作者表示感谢。研究生吕高、邴久阳、郭炳煊、刘钦佩、吴宏、周远强、马帅、崔晨、兰开江等在原位试验、室内试验、模型试验、数值分析中参与了相关调研、监测、模型构建和文字编写等工作，在此对他们的支持表示衷心的感谢。

本书所介绍的内容中，有些是首次提出的见解和看法，由于学术水平有限、工作经验不足，虽屡次修改审稿，仍有不成熟和不妥之处，恳请读者提出批评意见。

作者

2018年10月

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 西安钟楼保护现状	1
1.2 西安城墙保护现状	2
1.3 榆林卫城保护现状	3
1.4 砖-土结构古建筑保护研究中的科学问题	4
参考文献	6
第 2 章 在役古建筑病害特征及砖-土材料力学特性研究	10
2.1 西安钟楼基座结构病害特征及砖-土力学特性	10
2.2 西安城墙结构病害特点及砖-土力学参数	28
2.3 榆林卫城结构病害特点及砖-土力学参数	43
2.4 改性夯土材料试验研究	49
参考文献	54
第 3 章 钟楼基座渗漏病害特征及模型试验研究	56
3.1 钟楼防排水设施效能评估分析	56
3.2 基座内部水分迁移规律分析	58
3.3 基座内部水分场分布规律分析	62
3.4 降雨入渗对基座影响数值分析	66
3.5 钟楼基座渗漏规律模型试验研究	72
3.6 钟楼基座防排水措施建议	79
参考文献	81

第4章 砖-土结构劣化及人为破坏对古建筑基座稳定性影响研究	83
4.1 钟楼砌体结构损伤模型	84
4.2 钟楼芯墙夯土软化特性	86
4.3 钟楼裂缝成因数值分析	86
4.4 榆林城墙砖-土结构劣化及人为破坏对其稳定性影响研究	93
参考文献	111
第5章 地铁盾构施工对砖-土古建筑基座影响及控制措施研究	113
5.1 地铁盾构施工诱发地层及古建筑基础变形预测	113
5.2 地铁施工对城墙影响研究	129
5.3 地铁施工对钟楼影响研究	146
参考文献	155

第 1 章 绪 论

1.1 西安钟楼保护现状

西安钟楼，建于明太祖朱元璋洪武十七年（公元 1384 年），初建在今广济街口，与鼓楼相对，明神宗万历十年（公元 1582 年）整体迁移于今址。现位于中国陕西省西安市的市中心，城内东西南北四条大街的交汇处（属碑林区管辖）。钟楼建在方形基座上，为砖木结构，重楼三层檐，四角攒顶的形式，内有楼梯可盘旋而上。在檐上覆盖有深绿色琉璃瓦，楼内贴金彩绘，画栋雕梁，顶部有鎏金宝顶，金碧辉煌，体现了古代汉族劳动人民的聪明智慧和高超的建筑技艺。西安钟楼是中国古代遗留下来众多钟楼中形制最大、保存最完整的一座。西安是明代西北军政重镇，所以无论从建筑规模、历史价值和艺术价值各方面来说，它都居全国同类建筑之首。西安钟楼是西安历史文化名城保护的核心内容之一，也是西安城市历史与文化的重要载体，具有重要的文物价值、科学价值、艺术价值。

西安钟楼整体高 36m，由台基、上部木结构、攒顶三部分组成。台基为边长 35.5m 的正方形，高 8.6m，面积 1377.64m^2 ，下部有两条高宽各 6m 的交叉拱形券门。台基外墙为青砖砌体，墙厚约为 1m，内部为素土夯实填筑。上部为木结构总高 27.4m，分为上下两层平面布置，下层为一重屋檐，上层为两层屋檐，承重结构包括中心的 4 根通天圆柱及周围 12 根辅助圆柱，柱脚穿过下端柱脚石放置在夯土基础上，上端则分别延伸到各自的屋顶处。在结构传力方面，钟楼上部结构无论从局部还是从整体分析，都非常合理。构造技术在唐宋建筑基础之上采取了很多改进和创新，如图 1.1 所示。

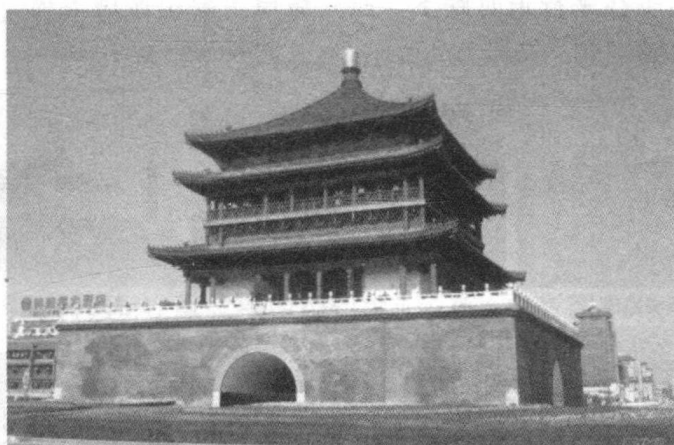


图 1.1 西安钟楼

西安钟楼是西安市目前保存较好的古代标志性建筑之一，但因年代久远，仍有不同程度的渗漏水、墙体开裂、泛碱、粉化、掉皮等病害现象存在，具体现状参见第 2 章 2.1 节。

1.2 西安城墙保护现状

西安城墙景区位于西安市中心区，是在唐皇城的基础上建成的。城墙完全围绕“防御”战略体系而建，城墙的厚度大于高度，稳固如山，墙顶可以跑车和操练。现存城墙建于明洪武七年至十一年（1374—1378年），至今已有600多年历史，是中世纪后期中国历史上最著名的城垣建筑之一，是中国现存最完整的一座古代城垣建筑。

明代扩建后的西安城墙，呈长方形，高12m，顶宽12~14m，底宽15~18m。南城墙4256m，西城墙长2706m，覆盖于隋唐时期的皇城之上，并分别向东、向北延长约1/4；东城墙长2886m，北城墙长4262m，为明洪武年间修建，总长达14km。整座城墙包括护城河、吊桥、闸楼、箭楼、正楼、角楼、敌楼、女儿墙、垛口等一系列设施，构成严密完整的中世纪古城堡。

最初的西安城墙完全用黄土分层夯打而成，最底层用土、石灰和糯米汁混合夯打，异常坚硬。后来又将整个城墙内外壁及顶部砌上青砖。城墙顶部每隔40~60m有一道用青砖砌成的水槽，用于排水，对西安古城墙的长期保护起了非常重要的作用。城四周环绕着又宽又深的城河，正对城门处设有可以随时起落的吊桥。吊桥升起，进出城的通路便被截断。

城墙每隔120m修敌台一座，突出在城墙之外，顶与城墙面平。城墙上共有敌台98座，上面都建有驻兵的敌楼。西安城东、西、南、北四座城门，分别有正楼、箭楼和闸楼三重城楼。闸楼在最外侧，其作用是升降吊桥。箭楼在中，正面和两侧设有方形窗口，供射箭用。正楼在最里，是城的正门。箭楼与正楼之间用围墙连接，叫瓮城，是屯兵的地方。瓮城中还有通向城头的马道，道上无台阶，便于战马上下。全城还建有马道11处。城墙四角都有突出城外的角台。除西南角是圆形，可能是保持唐皇城转角原状外，其他都是方形。城墙上外侧筑有垛墙，共5984个，上有垛口，可射箭和瞭望。内侧矮墙称为女墙，无垛口，以防兵士往来行走时跌下。西安城墙主要由城墙墙体、城门洞、敌台、敌楼、角楼、箭楼、瓮城组成，如图1.2所示。

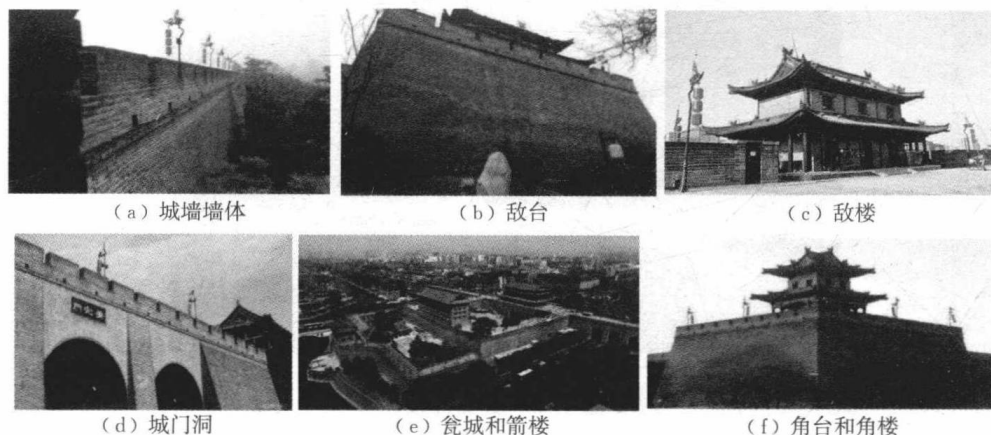


图 1.2 西安城墙组成部分（来源于网络照片）

西安城墙是极具有代表性的古代大规模城池遗迹之一，虽几经修复，但由于自然营力和人为破坏等因素，仍有不同程度的墙体开裂、泛碱、粉化、掉皮、砖块缺失、砂浆流失等各类病害，具体现状参见第2章2.2节。

1.3 榆林卫城保护现状

榆林卫城正式修筑始于明代正统十四年堡城的兴建，后再经过三次较大规模的扩建（史称“三拓榆阳”），形成最鼎盛的城池规模。至明末时期，“六楼骑街”的城市格局初步形成。此后，军事作用逐步降低，城池建设处于停滞状态，后由于沙漠南移，清同治二年北城墙收缩，最终形成当前的城池格局。该时期其他修建活动主要集中在城楼建筑和城墙修葺。到民国时期，主要结合军事防御需要对城墙进行了一定的修补和改造，增建了部分现代公共建筑，整体格局未有大的变化。新中国成立后，主要在部分城墙及其地下进行人防类军事构筑物的添加，1975年怀德门凯歌楼被拆除，1977年开始拓修二街，修建现代公共建筑和居住建筑。

榆林卫城的东西侧城墙较南北侧城墙长，南侧总长约700m，北侧总长约1100m，东侧总长约2250m，西侧总长约2150m，总周长约为6200m，总体呈古代“刀币”形状，如图1.3所示。

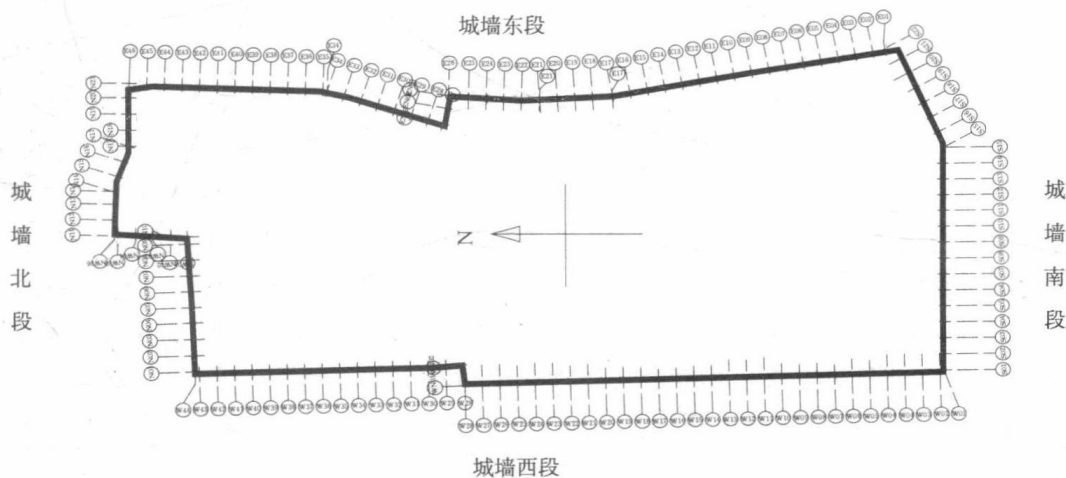


图 1.3 榆林卫城整体平面图

榆林卫城城墙共计15段，包括东城墙4段、北城墙5段、西城墙4段、南城墙2段，最长城墙段长度为1651.21m，最短城墙段长度15.71m。高度2.0~9.5m，顶宽0.32~9.71m，底宽0.48~15.31m，收分率1.1~3.0，包砖层数25~118层，主要材质为砖、土。现存城门4座分别是南门镇远门、东门振武门、北门广榆门、西门新乐门。现存瓮城2处分别是南门镇远门瓮城、东门振武门瓮城。现存城楼1座，为魁星楼。现存马面15处，东段10处，北段3处，西段1处，南段1处。

截至2018年，榆林卫城除了西、南城墙局部进行了保护性修复之外，其余部分仍在修复规划中，具体保护现状参见第2章2.3节。

1.4 砖-土结构古建筑保护研究中的科学问题

近 30 年来,中国城市化进程正在飞速发展,现代文明与古文明之间存在的碰撞已不可避免,这对于现代化“古城”的建设带来了前所未有的挑战,同时也给新形势下的岩土工程问题理论研究带了极大的机遇。

国际文物保护与修复研究中心 (ICCROM)、联合国教科文组织 (UNESCO)、中国古迹遗址保护协会 (ICOMOS)、中国文化遗产研究院、中国古都学会城墙保护专业委员会及中国岩石力学与工程学会下辖的古遗址保护与加固工程专业委员会等诸多古建筑保护机构,都在致力于深入研究探索古建筑,其中,中国的辽宁兴城城墙、江苏南京城墙、浙江临海台州府城墙、安徽寿县城墙和凤阳明中都皇城城墙、湖北荆州城墙和襄阳城墙、陕西西安城墙等明清城墙均被列入 2012 年世界文化遗产预备名单。鉴于此,今天中国的古文化遗产的保护工作已不仅仅停留在“加固”“维修”等单一概念之上,而应更加强调其防灾、预警等领域的重要性,其相关研究也必将成为现阶段和未来数年研究中的热点课题。以陕西诸多古建筑为例:西安榆林的明城墙和西安钟鼓楼尤为著名,在役古建筑多为砖石、砖木、夯土结构,然而因年代久远、饱经战火洗礼及城市建设等外界因素的影响,这些古建筑的安全性亟待考查。

已有研究文献针对古建筑结构的孕灾机理、预测模型及修复方法开展了大量研究,主要包括以下方面:

(1) 古建筑结构病害的孕灾机制研究。城市古建筑的病害及破坏过程多为砖石、砖木或夯土材料自身的劣化和外荷载所致,其中由于地下毛细水的上升、冷凝水、降雨入渗、水管泄漏和洪水等“水”的存在使古建筑材料逐渐产生“老化”,如雨水的冲蚀、冻融循环、可溶性盐分的迁移和结晶、生物化学作用的侵袭、金属构件的腐蚀等问题的产生,从而影响其“健康”“美观”和结构安全。国内外学者广泛采用 OM、SEM、EDS、DSC、XRPD、FTIR、ICP、RDX、TG、DTA 等室内物理-化学试验方法及变性梯度凝胶电泳 (DGGE) 和单体培养基生物分析法,来分别研究古建筑结构的劣化规律,这对于深刻认识古建筑老化机制和制订减缓古建筑风化的保护措施等方面具有重要的研究价值^[1-3,6]。此外,也有通过现场取样对古建筑材料进行常规力学试验,阐述其力学行为^[3],但要综合考察古建筑所赋存的温度场-水分场-盐分场等多场耦合作用下的材料破坏演化规律,仍存在较大的难度。随后,无损探测方法被广泛应用于古建筑病害探测中,如 GPR 地质雷达^[4,5]、IR 红外探测^[2]、TDR 电阻率方法、中子仪和核磁共振方法、环境振动原位测试法^[36]、弹性波探测法^[37],上述手段可从不同理论层面来研究古建筑材料的细观和宏观损伤力学行为和安全评估方法,但仍存在一定的局限性^[7],其对于“砖表土芯”式古建筑结构病害研究则更困难,目前,针对土遗址在干湿循环、风蚀、盐渍化等条件下的劣化效应研究取得了不少开创性成果^[8-10,54],对于古建筑的砖-土基座而言,研究其强度、刚度在水分作用下的软化、劣化模型,对评价该类古建筑的稳定性同样也具有重要意义。

俞茂宏在 20 世纪 90 年代起就编写了《西安古城墙研究建筑结构和抗震》和《西安古城墙和钟鼓楼:历史、艺术和科学》等方面的著作,开拓了古建筑研究的领域;关于地铁

盾构施工、地面微震、地铁振动和地震作用等对临近古建筑的影响研究,也引起了学者们的广泛关注^[32,39,46];自“5·12汶川地震”之后^[47],针对砖石古塔病害问题的研究也取得了重要研究成果,为古建筑的抗震保护和修复的规范性文件的制定奠定了重要基础,但仍囿于解释宏观现象和细观机理探讨的初级阶段,有必要开展多种无损探测系统相结合的方法来探索古建筑结构劣化机制。

(2) 古建筑结构病害预测理论研究。城市古建筑病害原因除自身材料的劣化之外,就是地基不均匀变形,一方面表现为地下水循环系统变化诱发的古建筑的地基增减湿变形问题;另一方面表现为地基土在地下开挖卸荷、周围环境振动作用、地裂缝的错动等作用下的长期变形问题,从而引起古建筑基础产生不同程度的裂缝,进一步诱发水分向古建筑基座内部入侵的恶性循环。国内外学者采取环境激励和冲击激励两种方式^[15],对室内建立的拱桥相似模型进行可控性振动破坏试验,得到了一种描述古建筑渐进性损伤评价新方法,或采用地震模拟振动台试验来研究古建筑在不同强度模拟地震激励下的动力反应和动力特性^[41,42],除此之外,相关学者还通过室内“环境—载荷”大型模型实验^[9,38],对现代砖砌体结构进行了冻融循环和干湿循环作用下的常规加载试验,研究砌体结构的损伤演化过程、承载力与刚度退化等力学特性,为砌体结构的抗震性能评估提供了理论支撑;为了对比研究采用加固措施前后的砌体结构的破坏特征和加固效果,国内学者开展了大量室内砌体结构模型试验^[42,53,56],为古建筑砖—土结构破坏的孕灾机理研究提供了宝贵的经验。对于古建筑砖—土结构而言,由于其结构的复杂性和具有初始损伤等特点,其破坏特性的室内相似模型试验的建立有待进一步研究。

(3) 古建筑结构保护及修复理论研究。城市地下空间的开发对古建筑的安全将产生严重威胁,以西安明城墙和钟鼓楼为例,规划中有地铁1号线、2号线、4号线、6号线等4条地铁线(8条隧道)下穿或绕穿这些约有600多年历史的古建筑,为了保护古建筑,实际工程中采取了极为苛刻的地基加固措施,或者由于设计缺陷对古建筑产生了不可估量的损坏等,这都将给我国经济造成巨大的损失和浪费。为此,国外学者首先提出了考虑地表建筑“结构刚度”贡献和地下开挖共同作用下的数值分析方法和建筑损害评估体系^[20,21,22],提出了“刚度修正”法的隧道作用下地表建筑许可变形的理论解析方法,此后国内学者又提出了基于Peck理论的“刚度修正法”^[23]经验公式预测模型。以中国古城墙、钟楼、古塔建筑为例,国内学者针对其地铁盾构施工开挖、地基加固措施、运营期间微震和地震等作用下对其变形及稳定性影响开展了多方面的理论研究,针对砌体非连续介质的应力—应变—时间和损伤问题开展了系列研究^[11-16,24-29,40,43,45],笔者也针对地铁2号线盾构施工诱发钟楼和城墙的“隆沉”规律进行了数值分析,提出了钟楼、城墙等古建筑基础最大许可“隆沉”控制标准为 $+5\sim-15\text{mm}$,局部倾斜不超过 $0.5\%\sim 1.0\%$ 的结论,并在实际工程中得以应用,上述研究为古建筑的保护控制理论提供了新的思路,但如何较为准确地估算地下开挖诱发的古建筑基础沉降,并根据控制标准来判断其破坏状态及提出相应的保护和修复措施还需要进一步研究。

除此之外,针对古建筑结构的动力特性研究也涌现出了不少理论和数值分析方法,常用的有Push—Over法分析和非线性动力分析、非平滑接触动力分析法(NSCD)等^[31,33-35],从砖石材料的抗拉强度和砌体结构的开洞效应、不同理论分析方法存在的差异

及震动参数的输入值的敏感性等角度出发,来研究古建筑的承载能力、动力特性、破坏模式和整体模态反应等,然而对于砖-土古建筑结构的非均匀性劣化特性及其病害程度的评估和预测仍是研究中的难点。

为了保护和修复地震后损伤的古建筑,国际研究机构和学者又开展了多方面的修复技术方面的研究性课题,ICOMOS 下辖的 ISCARSAH 机构^[48],于 2003 年通过了国际建筑文化遗产结构分析和修复的规范,提出了明确的遗址保存、病害诊断、分析、监测、加固等条款,如从通过改善古建筑材料的持水能力、强度特性、防水性、抗风化性、固化速率、抗冻融循环性能、抗弯韧性和加固地基等角度,提出了一系列的古建筑本体结构的修复方法和地基处理措施,如改性树脂、玻璃纤维、“灌浆围箍”的古建筑修复技术等^[42,49-51],此外,还开展了关于 PS-(C+F)浆液、GFRP 锚杆、木锚杆、PS(高模数硅酸钾)、SH(改性聚乙烯醇)、FRP 碳纤维复合材料^[55]等不同新型加固材料在加固土遗址前后的物理、力学性能的大量研究^[54],然而,工程实际中表明,这些高分子材料在加固古建筑时存在易于老化失效、污染环境和对古建筑有不可恢复性损坏的特点,使得古建筑保护修复仍存在一定的瓶颈,为此,需要进一步探索古代常用的古建筑保护和防护措施,如在夯土或砖砌灰缝中加入糯米灰浆、植物纤维筋体、植物油、红糖、骨骼、石灰、料姜石等,来提高古建筑和古遗址的强度、刚度,及其抗震、抗渗、抗风化特性,这将是一个新的交叉学科问题。

根据作者近年来针对西安钟楼、明城墙、榆林卫城调查资料显示,由于古建筑本体结构材料的恶化和受到环境变迁的影响(包括水力侵蚀、生物化学腐蚀、泛碱、夯土软化;地下水微循环变化、地下开挖或地裂缝扩展等诱发的地基再固结和不均匀沉陷;地铁或地面微振动等),导致古建筑砖-土结构自身强度逐渐减弱至丧失,从而对古建筑结构的损坏产生不可逆转的影响。这些病害已对其安全性态和美观产生了较大的影响。因此,为了有效保护古建筑,针对诱发古建筑损坏的诱因进行深入研究迫在眉睫,但对古建筑本体结构进行取样分析研究也极为有限。因此,如何采用较为可行的室内试验、模型试验、原位监测、无损探测、数值分析等综合技术来评价古建筑的病害和损伤特性,并提出切实可行的控制和修复措施,是本书研究的重点。

综上,尽管关于古建筑结构的病害及安全性态的评估应用研究已有诸多的工程实际可供借鉴,但由于古建筑结构的多样性和复杂性,目前国内尚未出台统一的古建筑砌体结构防灾减灾的规范性文本,本书将尝试从砖-土古建筑结构的研究领域出发,开展系列研究,主要包括:①在役古建筑病害特征及砖-土材料力学特性研究;②钟楼基座渗漏病害特征及模型试验研究;③砖-土结构劣化及人为破坏对古建筑基座稳定性影响研究;④地铁盾构施工对砖-土古建筑基座影响及控制措施研究。希望通过上述研究,为未来规范性文件的建立提供科学参考。

参 考 文 献

- [1] Xiao Ya, Fu Xuan, Gu Haibing, et al. Properties, characterization, and decay of sticky rice - lime mortars from the Wugang Ming dynasty city wall (China) [J]. Materials characterization, 2014

- (90): 164 - 172.
- [2] Martínez I, Castillo A, Martínez E, et al. Physico - chemical material characterization of historic unreinforced masonry buildings: The first step for a suitable intervention [J]. *Construction and Building Materials*, 2013 (40): 352 - 360.
- [3] Pineda P, Robador M D, Perez - Rodriguez J L. Characterization and repair measures of the medieval building materials of a Hispanic - Islamic construction [J]. *Construction and Building Materials*, 2013 (41): 612 - 633.
- [4] Kyriakos Labropoulos, Antonia Moropoulou. Ground penetrating radar investigation of the bell tower of the church of the Holy Sepulchre [J]. *Construction and Building Materials*, 2013 (47): 689 - 700.
- [5] Solla M, Lorenzo H, Rial F I, Novo A. Ground - penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools [J]. *Construction and Building Materials*, 2012 (29): 458 - 465.
- [6] Wang Qi, Ma GuangYou, He LinYan, et al. Characterization of bacterial community inhabiting the surfaces of weathered bricks of Nanjing Ming city walls [J]. *Science of the Total Environment*, 2011 (409): 756 - 762.
- [7] Franco Sandrolini, Elisa Franzoni. An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings [J]. *Building and Environment*, 2006 (41): 1372 - 1380.
- [8] 崔凯, 谌文武, 韩琳, 等. 干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33 (9): 1412 - 1418.
- [9] 张虎元, 严耿升, 赵天宇, 等. 土建筑遗址干湿耐久性研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32 (2): 347 - 355.
- [10] 崔凯, 谌文武, 王旭东, 等. 干旱区夯土遗址干湿盐渍耦合劣化微观结构分析 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2013, 44 (7): 2927 - 2933.
- [11] Jiang Hongyi, Wang Lizhong, Li Lingling, et al. Safety evaluation of an ancient masonry seawall structure with modified DDA method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014 (55): 277 - 289.
- [12] Pere Roca, Miguel Cervera, Luca Pelà, et al, Michele Chiumenti. Continuum FE models for the analysis of Mallorca Cathedral [J]. *Engineering Structures* 2013 (46): 653 - 670.
- [13] Alemdar Bayraktar, Abdurrahman Sahin, Mehmet Ozcan D, et al. Numerical damage assessment of Haghia Sophia bell tower by nonlinear FE modeling [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2010 (34): 92 - 121.
- [14] Russo G, Bergamo O, Damiani L, et al. Experimental analysis of the Saint Andrea Masonry Bell Tower in Venice. A new method for the determination of Tower Global Young's Modulus E [J]. *Engineering Structures* 2010 (32): 353 - 360.
- [15] Ramos L F, Roeck G De, Lourenço P B, Campos - Costa A. Damage identification on arched masonry structures using ambient and random impact vibrations [J]. *Engineering Structures*, 2010 (32): 146 - 162.
- [16] Jamal Idris, Marwan Al - Heib, Thierry Verdel. Numerical modelling of masonry joints degradation in built tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009 (24): 617 - 626.
- [17] Zhang Feng, Xiong Yonglin, Zhang Sheng, et al. Thermo - hydro - mechanical - air coupling finite element method and its application to multi - phase problems [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014 (6): 77 - 98.
- [18] Yang Qingsheng, Qin Qinghua, Ma Lianhua, et al. A theoretical model and finite element formulation for coupled thermo - electro - chemo - mechanical media [J]. *Mechanics of Materials*, 2010 (42): 148 - 156.

- [19] Chen Yifeng, Zhou Chuangbing, Jing Lanru. Modeling coupled THM processes of geological porous media with multiphase flow: Theory and validation against laboratory and field scale experiments [J]. Computers and Geotechnics, 2009 (36): 1308 - 1329.
- [20] Potts D M, Addenbrooke T I. A structure's influence on tunnelling - induced ground movements [J]. Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng, 1997: 109 - 125.
- [21] Miliziano S., Soccodato F M., Burghignoli A. "Evaluation of damage in masonry buildings due to tunnelling in clayey soils". Geotechnical aspects of underground construction in soft ground [C]. 3rd international symposium (IS - Toulouse France 2002) 3rd session, 2002: 49 - 54.
- [22] Mroueh H, Shahrour I. "Three - dimensional finite element analysis of the interaction between tunnelling and adjacent structures". Geotechnical aspects of underground construction in soft ground [J]. 3rd international symposium (IS - Toulouse France 2002) 6th session, 2002: 131 - 136.
- [23] 韩焯. 隧道施工引起地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [24] 张明泉, 马可婧, 刘灿, 等. 不同掏蚀深度下古城墙的稳定性数值分析 [J]. 地震工程学报, 2013, 35 (1): 133 - 138.
- [25] 王文斌, 刘维宁, 丁德云, 等. 盾构隧道施工对西安钟楼影响的数值模拟预测 [J]. 北京交通大学学报, 2011, 35 (4): 33 - 37.
- [26] 张引合. 西安地铁隧道盾构施工诱发的地表沉降规律及其控制技术 [D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- [27] 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 - 2919.
- [28] 袁大军, 郭建涛, 郑建国, 等. 西安地铁盾构施工对古城墙影响 [J]. 交通科学与工程, 2009, 25 (2): 53 - 59.
- [29] 孙尚业, 蒋美蓉, 王波, 等. 九华山隧道穿越段明城墙沉降的三维数值分析 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2007, 8 (1): 58 - 62.
- [30] 黄强兵, 彭建兵, 闰金凯, 等. 地裂缝活动对土体应力与变形影响的试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (4): 903 - 908.
- [31] Adolfo Preciado. Seismic vulnerability and failure modes simulation of ancient masonry towers by validated virtual finite element models [J]. Engineering Failure Analysis, 2015 (57): 72 - 87.
- [32] Alberto Pellegrinelli, Alessio Furini, Paolo Russo. Earthquakes and ancient leaning towers: Geodetic monitoring of the bell tower of San Benedetto Church in Ferrara (Italy) [J]. Journal of Cultural Heritage, 2014 (15): 687 - 691.
- [33] Fernando Peña, Paulo B Lourenço, Nuno Mendes, et al. Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower [J]. Engineering Structures, 2010 (32): 1466 - 1478.
- [34] Adel E, Abdelnaby, Amr S, et al. Integrity assessment of the Pharos of Alexandria during the AD 1303 earthquake [J]. Engineering Failure Analysis, 2013 (33): 119 - 138.
- [35] Giovanni Lancioni, Stefano Lenci, Quintilio Piattoni, et al. Dynamics and failure mechanisms of ancient masonry churches subjected to seismic actions by using the NSCD method: The case of the medieval church of S. Maria in Portuno [J]. Engineering Structures, 2013 (56): 1527 - 1546.
- [36] Angelo D' Ambrisi, Valentina Mariani, Marco Mezzi. Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests [J]. Engineering Structures, 2012 (36): 210 - 219.

- [37] Gokhan Osmancikli, Senay Ucak, Fatma Nur Turan, et al. Investigation of restoration effects on the dynamic characteristics of the Hagia Sophia bell - tower by ambient vibration test [J]. Construction and Building Materials, 2012 (29) : 564 - 572.
- [38] 郑山锁, 商效瑀, 张奎, 等. 冻融循环作用后再生混凝土砖墙体抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36 (3): 64 - 70.
- [39] 机械工业勘察设计研究院. 西安地铁二号线对城墙南北门影响评估报告 [R]. 西安: 机械工业勘察设计研究院, 2008.
- [40] 陈平, 俞作义, 宋泽维. 砖石古塔的地震风险评估 [J]. 工业建筑, 2015, 45 (4): 98 - 102.
- [41] 高大峰, 刘静, 李飞, 等. 西安城墙永宁门箭楼振动台试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34 (5): 140 - 149.
- [42] 李胜才, Dina D' Ayala, 呼梦洁. 灌浆与钢箍加固震损砖墙的抗震性能试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36 (4): 36 - 41.
- [43] 马蒙, 刘维宁, 等. 基于校准法的地铁振动对西安钟楼影响研究 [J]. 工程力学, 2013, 30 (12): 206 - 212.
- [44] 胡卫兵, 王鑫, 于海平. 城市轨道交通微幅振动对西安南城墙的影响分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32 (4): 88 - 95.
- [45] 雷永生. 西安地铁二号线下穿城墙及钟楼保护措施研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (1) : 223 - 228, 236.
- [46] 孟昭博. 西安钟楼的交通振动响应分析及评估 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [47] “5·12”汶川地震房屋震害研究专家组. “5·12”汶川地震房屋建筑震害分析与对策研究报告 [J]. 四川地震, 2009 (131): 42 - 47.
- [48] ICOMOS. Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage [J]. 2001.
- [49] Fang Shiqiang, Zhang Kun, Zhang Hui, et al. A study of traditional blood lime mortar for restoration of ancient buildings [J]. Cement and Concrete Research, 2015 (76) : 232 - 241.
- [50] Rimantas Mackevicius. Possibility for Stabilization of Grounds and Foundations of Two Valuable Ancient Cathedrals on Weak Soils in Baltic Sea Region with Grouting [C]. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013, Procedia Engineering, 2013 (57) : 730 - 738.
- [51] Iucolano F, Liguori B, Colella C. Fibre - reinforced lime - based mortars: A possible resource for ancient masonry restoration [J]. Construction and Building Materials, 2013 (38) : 785 - 789.
- [52] 张景科, 谌文武, 李最雄, 等. 土遗址锚固用 PS - (C+F) 浆液性能与结石体耐久性室内试验 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (10): 1802 - 1809.
- [53] 邓明科, 樊鑫森, 等. ECC 面层加固受损砖砌体墙抗震性能试验研究 [J]. 工程力学, 2015, 32 (4): 120 - 129.
- [54] 谌文武, 郭志谦, 徐彦荣, 等. 基于 SH 加固材料的土遗址夯土试样室内滴渗试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (8): 1517 - 1523.
- [55] 谷倩, 彭波, 刘卫国, 等. 碳纤维布抗震加固开门窗洞口砌体墙片的试验研究与受剪承载力分析 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28 (1): 80 - 88.
- [56] 姚远. 碳纤维加固严重破坏砌体墙的试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.