

布达拉宫地基基础加固分析

李治奇¹, 李军², 李果绵³

1.加拿大多伦多凯谛思设计公司, 加拿大 多伦多 M5V 2T6

2.鞍钢集团公司教育培训中心, 辽宁 鞍山 114000

3.中冶焦耐(大连)工程技术有限公司, 辽宁 大连 116085

DOI:10.61369/UAID.2026020051

摘 要 : 布达拉宫是始建于公元7世纪的世界文化遗产, 其依山而建的特殊建造方式形成了复杂而独特的“地垄”地基结构。本文系统梳理了布达拉宫地基基础的工程特点与历史病害, 分析了地垄墙体的开裂机理与渗漏诱因, 总结了两期大规模维修工程中地基基础加固的主要技术手段, 包括低压灌浆补强、改性阿嘎防水处理及结构监测系统的应用。研究表明, 布达拉宫地基山体岩体自身稳定性良好, 地垄加固修复是建筑安全的关键所在。两期维修工程形成了“由下而上”的维修策略和“传统工艺与现代科技相结合”的技术路径, 使布达拉宫地基基础的结构安全得到了根本改善, 其维修经验对同类山地古建筑的加固保护具有重要的参考价值。

关 键 词 : 布达拉宫; 地垄加固; 地基基础; 低压灌浆; 古建筑保护

Analysis of Foundation Reinforcement for the Potala Palace

Li Zhiqi¹, Li Jun², Li Guomian³

1.Arcadis Design Company, Toronto, Canada M5V 2T6

2.Education and Training Center of Angang Group Corporation, Anshan, Liaoning 114000

3.MCC Coking & Refractories (Dalian) Engineering Technology Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116085

Abstract : The Potala Palace, a UNESCO World Heritage Site constructed in the 7th century AD, features a unique "ridge-like" foundation structure formed by its mountain-adapted construction methods. This paper systematically examines the engineering characteristics and historical damages of the palace's foundation, analyzes the cracking mechanisms and leakage causes of the ridge walls, and summarizes the key reinforcement techniques employed in two major restoration phases—including low-pressure grouting reinforcement, modified Aga waterproofing treatments, and structural monitoring systems. The study demonstrates that the mountainous rock mass supporting the foundation exhibits excellent inherent stability, with ridge reinforcement being critical to structural safety. The two restoration phases implemented a "bottom-up" approach integrating traditional craftsmanship with modern technology, fundamentally enhancing the structural integrity of the foundation. These restoration experiences provide valuable references for the conservation and reinforcement of similar ancient mountain structures.

Keywords : Potala Palace; ground ridge reinforcement; foundation base; low-pressure grouting; ancient building conservation

引言

布达拉宫坐落于西藏自治区首府拉萨市中心的红山(玛布日山)之上, 海拔约3 700 m, 是世界上海拔最高的古代宫堡建筑群。布达拉宫整体为石、土、木混合结构, 东西长360 m, 南北宽约140 m, 总建筑面积约13.8万 m², 主楼共13层。1961年, 布达拉宫被列为第一批全国重点文物保护单位, 1994年被联合国教科文组织列入《世界遗产名录》。布达拉宫以红山山体为天然地基, 依山势向上伸展, 是典型的山地建筑。其基础形式极为特殊——古人先在陡峭的山坡上用土石起墙, 然后在墙上搭架梁木, 形成一种被称为“地垄”的中空、多层的土木石复合结构。地垄随坡度设定层数, 红宫和白宫的地垄可达5至6层, 墙体为夯土墙或石墙, 墙上铺杨木椽子和碎树枝。这种构造既解决了山地建筑的找平难题, 又通过增加建筑底层面积确保了结构基础的稳定。地垄高者达17 m, 宽约8 m, 绝大部分为全封闭结构, 有门有窗。此外, 布达拉宫外墙厚达2 ~ 6 m, 采用花岗岩砌筑, 每隔一段距离灌注铁汁以增强墙体抗震能力, 形成了坚固稳定的建筑整体。

作者简介: 李治奇(1991.12-), 男, 汉族, 辽宁鞍山人, 土建工程师, 硕士, 研究方向: 土木结构。

一、地基岩土条件与稳定性评价

（一）地质岩性

野外地质调查表明，布达拉宫地基岩体岩性为灰黑色角岩化钙质板岩，表层岩体多呈弱风化，局部为强风化。岩体整体较坚硬完整，基本质量等级分类为Ⅱ～Ⅲ级。研究表明，红山山体处于构造带包围之中，但岩体内部节理裂隙被后期高强度矿物充填，形成了两个重要的有利地质条件^[1]。

（二）稳定性评价

综合研究成果显示，布达拉宫地基岩体自身是基本稳定的。然而，历年勘查发现局部岩体存在不同程度的孔隙与裂隙。尤其是来自建筑屋面渗漏、山体地下水赋存等因素引起的水分下渗，可能软化岩体裂隙中的充填物，降低岩体的整体性和承载能力。因此，完善给排水系统、减少地下水对地基岩体的不利影响，是维持地基稳定性的关键配套措施之一。在2002—2007年的第二期保护维修工程中，项目对布达拉宫建筑地基基础进行了系统的稳定性评价，确认地基山体无需进行大范围加固处理，而应将工程重点聚焦于地垄基础的修复与加固。

二、地基基础病害及成因分析

由于年代久远，加之建筑物本身构造特殊且受自然环境变化的持续影响，布达拉宫建筑群出现了不同程度的基础下沉和破损、墙体裂缝、木构件虫蛀及变形等险情^[2]。20世纪80年代，布达拉宫的基础沉陷和墙体开裂问题已极为突出，部分墙体甚至出现局部坍塌，壁画出现空鼓病害。1989年第一期维修工程启动前，建筑结构状况已十分严峻，整座宫殿急需系统抢险。

综合研究揭示，布达拉宫建筑裂缝的形成具有三种力学机制：一是地垄墙体自身破坏引起的结构变形，二是建筑上部结构不均匀变形传导至地垄的次生损伤，三是由雨水渗漏导致的黄泥黏合土软化、石墙开裂所引发的连锁破坏^[3]。

1998年拉萨遭遇强降雨后，布达拉宫再次出现数十处险情。2002年二期维修期间，施工人员在対地基基础的摸底排查中陆续新发现了多处分属于不同历史建设阶段的地垄，已查明的地垄数量从一期维修时的数百处增至802处。这些地垄普遍存在泥土流失、片石脱落及大面积开裂等病害。

地垄病害的成因主要包括以下几个方面：第一，墙体砌筑材料老化。地垄墙体大多以块石配合黄泥浆砌筑，黄泥浆经长期风化、潮湿冲刷后黏合力显著下降，导致墙体出现开裂、鼓闪甚至坍塌。第二，虫蛀腐朽严重。地垄内木椽子长期处于潮湿环境中，虫蛀、腐朽问题突出，部分梁木已完全丧失承载能力。第三，渗漏侵蚀。屋顶阿嘎土防水层失效导致雨水下渗，严重加剧了地垄内的潮湿环境和材料劣化^[4]。第四，地垄空间狭窄且封闭，施工人员难以进入探查与维修，病害长期得不到及时发现与

处理。

三、地基基础加固技术分析

（一）总体维修策略

布达拉宫地基基础加固的核心维修对策可归纳为两条原则性结论：地基山体无需进行大规模加固处理，重点应放在地垄墙体的加固修复上；维修顺序应由下而上逐步进行，先加固地垄基础，再处理上部墙体裂缝，确保在基础稳定后再进行后续修缮。

在维修周期安排上，先后实施了两期大规模维修工程。第一期维修（1989—1994年）侧重于殿堂内上部木结构的抢险加固，清除了地垄内积存数百年的废弃物，完成了111个项目的修缮工作，总投资约5 500万元^[5]。第二期维修（2002—2009年）则聚焦于建筑基础的全面加固和屋面渗漏问题的根治，在维修内容上形成了“脚”和“头”并重的技术路线，即重点解决地垄和屋顶两大关键部位的安全问题。两期维修共计投入资金逾2.5亿元，为实现“至少50年内不再进行大修”的目标奠定了坚实基础。

（二）低压灌浆技术

低压灌浆是布达拉宫地基基础加固中最核心的工程技术之一。针对地垄墙体普遍存在的开裂、疏松、黄泥浆失效等问题，维修工程设计并实施了低压灌浆补强方案，实现了对文物建筑的最小扰动，有效规避了大拆大卸造成的不可逆损伤。在施工准备阶段，工程技术人员首先采用探地雷达等无损检测手段，对地垄墙体的密实度和空鼓范围进行探测，准确标记需要补强的区域，为低压灌浆施工提供了精确的靶向定位。

灌浆材料配比经历了系统的试验优化。前期在布达拉宫壁画空鼓修复研究中，灌浆材料的优选试验初步筛选出以PS为主剂、粉煤灰掺加适量巴嘎土为填料的配比方案。在地垄墙体灌浆中，初期尝试使用水泥与沙子的常规配比^[6]，但发现黏性过大且干缩特性与古老石墙不匹配，导致墙体出现二次开裂。经过反复试验和调整，施工人员按特定比例加入黄土和石灰，最终使灌浆材料的力学性能和相容性达到了理想状态。灌浆压力控制采取低压方式，避免了高压注浆对古旧墙体可能造成的冲击破坏。

由于部分地垄空间极为狭窄（高者虽达17 m，但内部横向空间十分受限），施工人员在部分区域甚至无法直立转身^[7]。为此，项目专门从国外引进了适用于狭窄作业面的小型灌浆设备，并先后更换了三种灌浆机型，最终选择了对地垄墙体修补最可靠的施工机械。布达拉宫是藏式建筑中首次采用低压灌浆工艺的古建筑，此项技术的成功应用为同类高原古建筑的基础加固积累了宝贵经验。

（三）地垄结构加固措施

地垄加固是布达拉宫二期维修的重中之重，其内容包括墙体补强、梁木更换和基础整固等多方面工作。地垄内结构复杂，木椽子极不规整，局部坍塌的情况时有发生。在墙体修复方面，对于开裂、风化严重的砌体，采用抽砌法逐一替换与原石材颜色、质地一致的石材块体，最大限度地保持了地垄墙体的原真性和风貌一致性。与此同时，对因长期渗水导致黄泥浆失效的墙体接

缝,采用低压灌浆工艺进行注浆补强和结构加固,显著提高了墙体的整体性和抗裂能力。在木结构修复方面,针对梁木虫蛀、腐朽严重的状况,采用了新型木材防腐剂结合加压防腐处理技术进行保护处理。腐朽严重、丧失承载能力的木椽子和横梁则依据原规格、原材料进行替换^[6]。由于地垄内施工环境恶劣——空间狭窄、采光不足且存在坍塌风险,施工人员在作业中极为谨慎,整个地垄建筑垃圾清理即耗时三年之久。经过两期工程的持续努力,已发现的地垄总数约为802处,其中绝大多数已得到系统性加固修复。加固后的地垄经受住了实际考验:2008年当雄发生地震时,拉萨震感显著,但加固完成的地垄未受到任何不利影响,验证了加固方案的科学性和有效性。

(四) 防水系统改良

屋面渗漏是地基基础病害的重要诱因之一。布达拉宫屋面上采用阿嘎土夯筑工艺进行防水处理,但由于传统阿嘎土夯筑后存在干缩裂缝、抗冻融性能不足等问题,长期使用后渗漏普遍发生,导致雨水下渗进而影响地垄基础和墙体结构。在二期维修工程中,技术人员对传统阿嘎土进行了系统的改性研究与试验,通过添加特定外加剂显著提高了阿嘎土的抗压强度、抗冻融性能和防水能力。另一项创新是在屋面阿嘎土层与结构层之间增设由改性阿嘎材料和柔性防水层组成的复合防水体系^[9],形成“改性阿嘎”夹层结构,从根本上解决屋面渗漏问题。经过改性处理的阿嘎土防水效果得到了长期验证,至今未再出现大范围的渗漏问题。

(五) 结构监测系统的建立与应用

地基基础的长期安全维护离不开科学的监测体系。自2006年起,布达拉宫逐步建立了结构健康监测系统。第一期监测系统于2012年正式投运,核心聚焦木结构关键部位的动态响应,系统由传感器系统、数据采集与传输系统、数据管理与分析系统三个子系统组成,安装有376支光纤光栅应变传感器和12支光纤光栅倾角计,全程采用光信号传输,完全消除了电信号带来的火灾隐患,目前该系统已连续稳定运行十余年,累计收集监测数据数

千万条。第二期监测系统于2020年正式投运,监测范围延伸至地垄、墙体和山洞,涵盖墙体裂缝变形、位移、结构面外变形、温度湿度、地震响应等多项指标,共布设各类传感器388支及无线节点若干。2023年,布达拉宫管理处联合科研机构搭建了山体监测系统,用于监测区域内地下水赋存及沉降情况。至此,从木结构到墙体地垄,再到山体环境,形成了全方位覆盖的结构监测网络,使保护人员能够精确掌握地基基础的动态状态,并据此作出科学决策,实现了从被动抢险到主动预防的转变^[10]。

四、结论与讨论

布达拉宫依红山山体而建,地基岩体稳定性良好,无需对地基山体进行大规模的岩土加固处理。建筑安全的关键在于地垄基础的维护与修复。地垄墙体病害具有裂缝扩展、结构变形和雨水侵蚀三种力学机制,其中雨水渗漏是诱发和加剧病害的重要原因。必须通过屋面防水改良与地垄墙体补强协同推进才能取得持久效果。低压灌浆技术、改性阿嘎防水技术和结构监测技术的综合应用,形成了布达拉宫地基基础加固的科学体系。维修工程遵循“由下而上、逐级推进”的施工顺序,先加固地垄基础再处理上部结构裂缝,在最大限度保护文物原状的前提下实现了结构安全的根本改善。

布达拉宫地基基础加固的成功实践为山地古建筑的保护提供了可资借鉴的工程范例。实践证明,传统的藏式建造工艺与现代工程科技的结合,是高原地区古建筑可持续保护的有效路径。然而,地垄作为仅见于布达拉宫的独特地基形式,其细观力学行为、长期蠕变特性及在多因素耦合作用下的劣化规律仍有待深入研究。后续应结合监测数据的长期积累,进一步开展地垄结构耐久性评估和山地岩土—建筑结构相互作用机理的研究,为布达拉宫的永续传承提供更加科学精准的技术支撑。

参考文献

- [1] 何满潮,金永军,孙晓明,等.布达拉宫地基岩体稳定性研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(4):514-518.
- [2] 何满潮,韩雪,刘成禹,等.布达拉宫西印经院地基应力特征与结构变形分析[J].岩土力学,2013.
- [3] 西藏自治区科学技术奖推荐书——项目简介及主要完成人情况(何满潮团队).同济大学.
- [4] 布达拉宫——穿越千年的大修[N].北京周报,2009-03-24.
- [5] 西藏布达拉宫将建立建筑整体数字化模型 测绘精确至毫厘[N].中国西藏新闻网,2017-08-24.
- [6] 三大重点文物保护维修工程:盛世瑰宝谱华章[N].西藏日报,2009-09-14.
- [7] 龙珠多杰,格龙江初.建筑述史:布达拉宫营造史中多民族建筑技艺的互鉴与交融研究[J].西藏大学学报(社会科学版),2025,40(03):50-58.
- [8] 崔玥,杨娜.布达拉宫地震危险性分析[J].振动与冲击,2024,43(15):95-104.
- [9] 玛玖吉.试论对藏式建筑古籍的认识及其与藏式建筑的关系[J].明日风尚,2023,(08):164-166.
- [10] 多庆巴珠.浅谈藏族传统建筑文化的特点[J].建筑,2022,(03):62-64.