

**摘要** 现场调查表明,开平夯土碉楼普遍存在墙体开裂、风雨侵蚀、屋面和楼面坍塌、工作环境潮湿导致夯土墙起壳剥落等问题,结构安全状况堪忧,不利于世界文化遗产的保护及活化利用。在调研分析的基础上,文章从营造正常的夯土墙使用环境、恢复结构整体性、控制基础不均匀沉降等方面提出抢救式保护方案,希望通过这些方案的实施,为后期预防性保护创造条件。在满足可逆性原则的前提下,分别提出应对减轻楼面荷载以及增加楼面荷载情况的结构方案,以满足夯土碉楼活化利用的结构安全需求。

**关键词** 遗产保护 开平碉楼 夯土 结构 活化

**ABSTRACT** On-site investigations have shown that Kaiping Diaolou with rammed earth wall generally suffer from wall cracking, wind and rain erosion, roof and floor collapse, and humid conditions, which result in the peeling off of the wall shell of rammed earth building. The structural safety is also in poor condition, which is not conducive to the preservation and activation of world cultural heritage. Based on investigation and analysis, this article proposes emergency maintenance technology from aspects of a normal environment for rammed earth walls, restoring structural integrity, controlling uneven settlement of foundations, etc. According to the activation and utilization of Kaiping Diaolou with rammed earth wall, it also proposes the reversible structural solutions for reducing the floor load and increasing the floor load respectively.

**KEY WORDS** heritage preservation, Kaiping Diaolou, rammed earth, structure, activation

**DOI** 10.12069/j.na.202104144

**中图分类号** TU-87 **文献标志码** A **文章编号** 1000-3959 (2021) 04-0144-04

**基金项目** “十三五”国家重点研发计划课题项目(2019YFD1100905)

柏文峰 迟辛安 周来

BAI Wenfeng CHI Xin'an ZHOU Lai

# 开平夯土碉楼保护利用的结构技术研究

## Research on Preservation and Activation of Kaiping Diaolou with Rammed Earth Wall

开平碉楼是一种集防御、防洪、居住和中西建筑艺术于一体的多层塔楼式乡土建筑<sup>[1]</sup>,是西方近代先进材料和结构技术与岭南侨乡本土建筑技术及建筑文化碰撞交融的结果<sup>[2]</sup>。“开平碉楼与村落”于2007年被正式列入世界文化遗产,其保护及活化利用对开平的文化、旅游及社会发展具有重要意义。

按照建筑材料划分,碉楼墙体有4种类型,分别是夯土墙、砖墙、钢筋混凝土墙以及混合墙体<sup>[3][4]</sup>。混合墙体中,也包括底层夯土与上部砖砌体混合、底层夯土与上部钢筋混凝土墙体混合的做法。根据2001年开平碉楼数量普查报告,当年尚存夯土碉楼约100座<sup>[4]</sup>。与砖墙和钢筋混凝土墙相比,夯土墙的强度和耐久性较差,且由于夯土碉楼不在核心保护区内,维护力度、资金不足,普遍存在结构安全问题,亟需开展夯土碉楼结构安全调查并采取相应

的结构修缮措施,以利于夯土碉楼的保护及再利用。

夯土属于半永久性建筑材料,极易受到风雨侵蚀,侵蚀坍塌后的维修困难大大超过砖墙、钢筋混凝土墙甚至木结构,因此,以保护替代修复具有尤为重要的意义。世界文化遗产核心区内的碉楼全部是混凝土碉楼和砖砌碉楼,夯土碉楼的保护因而一直未得到应有的重视。2003年,国际遗址理事会(ICOMOS)大会通过了《建筑遗产分析、保护和结构修复原则》(Principles for the Analysis, Conservation and Structure Restoration of Architectural Heritage)<sup>[5]</sup>,参照其中第1.6条提出的保护流程,有必要通过现状调研,分析夯土碉楼存在问题,并针对迫在眉睫的安全问题提出抢救式保护方案,经论证后实施,排除安全隐患,为后期预防性保护和活化利用创造条件。

1 采用夯土墙的适庐



[作者单位] 柏文峰、周来:昆明理工大学建筑与城市规划学院(昆明,650000)

迟辛安:香港中文大学建筑学院(香港特别行政区)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 一 开平夯土碉楼结构特点及现状

### 1 墙体

碉楼的主体结构是四面墙体围合而成的筒体结构<sup>[6]</sup>，平面接近方形。夯土碉楼层数3~5层（图1），楼面采用单向木梁密肋，上铺木板，相邻楼层的木梁铺设方向相互垂直（图2），木梁端部夯筑在夯土墙内，为夯土墙提供侧向支撑。

当地夯土墙俗称“泥墙”“三合土墙”<sup>[7]14</sup>，夯土墙底部厚度约0.5 m，内侧垂直，外侧收分变薄。其施工过程是先将三种材料——山泥、石灰、红糖（开平人称黄糖）混合，经过长时间沤制后放入通长夯土墙模板内，并用木夯锤夯实。夯土碉楼纵横方向墙体交错夯筑，在墙角形成不连续的竖向施工接缝（图3），这些间断的施工缝缺乏拉结作用的构造措施是导致后期夯土墙角部竖向通缝开裂的主要原因。

### 2 地基处理

夯土碉楼多采用现浇混凝土墙下条形基础，经济条件好的甚至采用碉楼底层平面满铺的混凝土板式基础。夯土碉楼自重大，基地面积小，天然地基难以满足承载力和地基稳定性的要求，为此夯土碉楼采用两种类型的地基处理方式<sup>[7]13</sup>：一种是木桩基础，把松木或杉木端部削尖加工成木桩，再用人力把一排排密布の木桩打入碉楼基础下的土体，形成桩基（图4），此技术适用于软土层较薄地区，碉楼自重通过木桩穿透软土层抵达坚硬持力层；另一种是筏基，将基础底面一定深度的松软土体挖出，再把原木一层层并排平放在开挖的基坑里，相邻层的原木互相垂直，在夯土墙的基础下面形成筏式基础，此技术适用于软土层深厚地区，依靠原木

层叠出挑扩大基底面积，减少碉楼自重对软土地基产生的竖向附加应力。开平东部和中部为谭江河谷冲积平原<sup>[8]</sup>，软土层深厚，适合采用筏式基础做法。这两种地基处理方式能显著减少基础沉降，减轻地基不均匀沉降导致的楼身倾斜。但在土质特别松软的情况下，即便采用筏基，也存在由于地基不均匀沉降而导致碉楼明显倾斜的实例（图5）。

### 3 屋面

屋面是夯土碉楼在建筑艺术上最精彩的部位（图6）。据《开平县文物志》记载，开平碉楼楼顶装饰艺术有近百种不同的建筑风格，其中典型的有中国传统的硬山形式、中西合璧式、古罗马式、德国堡垒式等等<sup>[9]</sup>。夯土碉楼平面尺寸较小时，多采用中国传统的硬山形式，少量采用西洋式或硬山形式的中西合璧式<sup>[10]</sup>。硬山形式屋面结构采用硬山搁檩，木质顺水条直接铺瓦的做法。

### 4 结构现状

采用抽样法调查了塘口镇的5栋夯土碉楼。其中，基本完好1栋、局部坍塌3栋、危楼需全部拆除1栋，具体情况如下。

（1）瓦下村村前夯土碉楼 该碉楼采用混合墙体，底部3层采用夯土墙，顶层采用砖墙，屋面采用中国传统的硬山形式。由于夯土配比不合理，夯土墙体已经大面积酥松剥落，墙身遍布竖向通长裂缝，该楼紧邻村口道路，须尽快采取墙体加固和支护措施，避免其突然倒塌伤及路人（图7）。

（2）瓦下村村后夯土碉楼 该碉楼为5层夯土碉楼，夯土墙体基本完好，楼面体系完整，屋面采用中西合璧的硬山形式，纵横墙体交汇处有竖向开裂通缝（图8）。该楼四周植被茂盛，夯土墙底部

常年处于阴潮状态，有表层起壳、局部脱落的现象（图9）。

（3）公安楼 此楼曾为小学，共5层，屋顶正面采用西式立柱与券拱相结合的柱廊装饰（图10）。该墙体夯筑质量较好，但纵横墙体交汇处有竖向开裂通缝（图11）。公安楼平面尺寸较大，在碉楼每侧夯土墙的中部也有竖向裂缝。该楼屋面和楼面已经塌落，夯土墙内壁有明显的雨水冲蚀痕迹。

（4）山山村夯土碉楼 该碉楼高5层，屋面采用中国传统的硬山形式，其屋面及楼面已经坍塌，木质构件腐朽严重；纵横墙体交汇处有竖向开裂通缝，树木根系在夯土墙裂隙内延伸，加剧夯土墙开裂和歪斜，导致东侧夯土墙一层严重倾斜，二层以上已经倒塌（图12、13）。

（5）某4层加固夯土碉楼 该碉楼屋面和楼面完全塌落，无法判断屋顶原有形态。纵横墙体交汇处有宽约2~4 cm的竖向开裂通缝。为避免土楼墙体外闪，已采用钢带对夯土墙进行整体约束，但约束不足，且未采取关键的防雨淋措施，加固措施对外观风貌影响较大（图14）。

通过上述调查，总结出夯土碉楼结构安全存在的普遍问题。

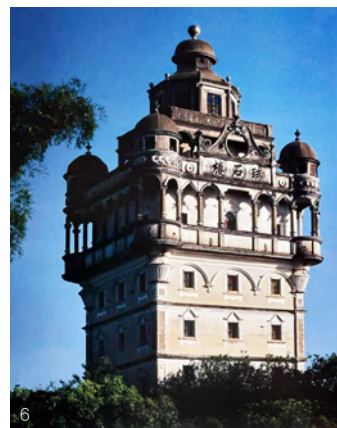
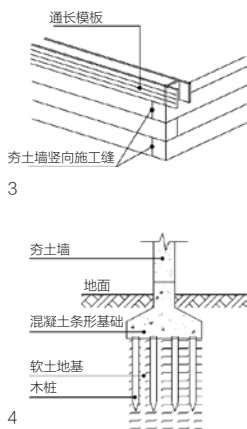
5栋夯土碉楼都存在纵横墙体交汇处竖向开裂通缝，使筒体结构的整体性受到严重削弱，加之夯土墙与基础没有任何拉结措施，在竖向荷载作用下可能失稳。

4栋夯土碉楼屋顶坍塌，导致雨水直接冲刷夯土墙，对夯土墙耐久性极为不利。失去屋顶的遮盖防雨后，楼面结构体系在长期的潮湿环境下腐朽，使高耸的夯土墙在层高处失去侧向支撑和拉结，再

2 单向木梁楼面仰视  
3 纵横夯土墙接缝

4 软土地基上的桩基础  
5 整体倾斜的“边筹筑楼”

6 瑞石楼的屋面造型





7 瓦下村村前夯土碉楼 9 夯土墙起壳剥落 11 墙角处竖向通长裂缝及雨水冲蚀内墙 13 夯土墙坍塌  
8 瓦下村村后夯土碉楼 10 公安楼 12 网山村夯土碉楼 14 用钢带和角钢加固的夯土墙

加上夯土墙角部竖向通长裂缝的分割,使得4—5层通高的夯土墙成为独立墙片,墙体高厚比接近30,在水平风力和地震作用下,极易倾覆倒塌。

夯土碉楼的某一侧夯土墙彻底垮塌后,导致基础底面压力分布产生变化,可能会产生基础不均匀沉降,致使碉楼逐渐整体倾斜。

植物(尤其是树木)根系在夯土墙裂缝中生长,进一步加大裂缝宽度,加剧夯土墙侵蚀、开裂,甚至歪斜。

场地排水条件差,周围植被茂盛,夯土墙底部长期处于阴湿状态,夯土墙起壳、剥落现象普遍,降低了夯土墙的承载能力和耐久性。

上述问题的产生与传统夯土技术的先天不足及后期维护力度不够有密切关系,夯土碉楼的结构安全现状不容乐观。已有的加固措施针对性不强,缺乏系统性、有效性,未起到改善结构安全、提高夯土墙耐久性的作用,不能满足夯土碉楼保护利用的结构安全要求。

## 二 基于结构安全的夯土碉楼的保护

“开平碉楼与村落”于2007年被正式列入世界文化遗产,当地碉楼管理机构制定了7方面的保护措施,其中包括碉楼的保护与修复工作<sup>[8]</sup>。自

2011年以来,陆续完成了76栋碉楼的建筑测绘图及修缮设计方案,并据此开展了碉楼修缮工作<sup>[11]</sup>。但从本次抽样调查情况看,夯土碉楼的保护工作力度还需要大幅度加强。

与砖墙和钢筋混凝土墙的碉楼相比,夯土碉楼生土墙体的抗压强度最低,整体性最弱,耐水性最差。针对夯土碉楼存在的结构共性问题,提出以下结构安全改进建议。

### 1 营造正常的夯土墙使用环境

在长期的阴湿环境下,夯土墙的结构强度和耐久性会受到很大影响。应改善夯土墙碉楼周围场地的排水条件,及时排走场地积水;及时清理植物遮挡,保证夯土墙底部干燥;清理夯土墙裂缝中的植物根系,避免根系发育进一步破坏夯土墙;已经塌落的屋面应及早恢复,减少雨水对墙身的直接冲蚀。

### 2 恢复结构整体性

恢复结构整体性的技术关键是加强纵横两个方向夯土墙的拉结,恢复筒体的整体受力特征,为夯土墙提供可靠的侧向支撑。首先,应采用合适的材料和技术对裂缝进行填补,待填补材料达到设计强度后,通过外箍结合内撑对夯土墙施加侧向约束。所谓外箍,就是在夯土碉楼的层高处设置外侧横向封闭预应力铁箍,防止夯土墙外闪;内撑,就是利

用夯土墙上原有楼面木梁的孔洞作为支座,在夯土墙内侧设置联系钢梁,为夯土墙提供内侧约束。为避免夯土墙墙角被预应力铁箍压坏,可在铁箍转角处内侧用角钢设置包角。

### 3 控制基础不均匀沉降

在开平冲积平原地区,碉楼基础下的地基土松软且厚度较厚,多采用筏式基础做法。夯土墙筒体是双轴对称的方形或矩形平面,上部结构自重的重心与筏式基础形心重合,筏式基础底面对地基土产生均匀的竖向压力,沉降均匀。如果夯土墙筒体的某一面夯土墙坍塌,会使上部结构重心偏移,导致坍塌夯土墙一侧的筏式基础底面对地基土的竖向压力减小,而相反一侧筏式基础底面压力增大,筏式基础产生不均匀沉降,使夯土碉楼发生整体倾斜。因此,对于一侧坍塌的夯土碉楼,如果其处于土质松软的建设场地,应尽快把坍塌的夯土墙重新夯筑起来,保持上部结构重心与筏式基础形心重合,减轻筏式基础的不均匀沉降,避免夯土碉楼发生较为显著的整体倾斜。

### 4 恢复夯土工匠技艺传承,提炼传统夯土技术精华

当地碉楼管理部门应委托相关专业机构,对土料配比、夯实机具及构造措施等方面的传统夯土经验智慧进行分析总结。在此基础上,组织培养精通当地夯土碉楼工艺并充分理解碉楼保护科学理念的工匠队伍,由工匠队伍承担夯土碉楼的维护和修复工作<sup>[12]</sup><sup>8</sup>。提炼传统夯土技术精华,用传统材料、构造加强夯土墙转角处的整体性,避免夯土墙角部产生竖向通长裂缝。重新夯筑的夯土墙应尽可能采用原有夯土墙坍塌的土料,采取有效措施加强与原有夯土墙的拉结,确保新旧夯土墙能够协调工作。

### 5 分阶段性的保护

夯土碉楼的保护需要持续的资金投入和可靠的技术支持。在资金有限的情况下,可进行分阶段的保护,近期可参照“营造正常的夯土墙使用环境”的相关做法,尤其要尽快恢复坍塌的屋面,减轻雨水冲刷对夯土碉楼的不利影响,提高夯土碉楼的耐久性。当有资金和技术的充分保证时,再着手修复结构的整体性。在松软场地环境下,应采取控制夯土碉楼整体倾斜。

### 6 开裂特别严重、岌岌可危的夯土碉楼保护方法

该类夯土碉楼可采用树脂灌缝、墙面喷涂透明保护剂预防墙土脱落、设置支撑等加固方法,在一定程度上恢复整体性。加固过程虽然不可逆,但在现有技术条件下不失为一种迫不得已的

保护方法<sup>[13]</sup>。

### 三 基于结构安全的夯土碉楼的利用

随着时代的发展，碉楼已经不再承载传统的防御和防洪功能，但其作为体现中西建筑文化在特定时期、特定乡村密切融合的独特历史载体，既有重要的保护价值，也有重要的旅游价值，还起着联系海外华侨、华人与开平故里亲情的重要作用。

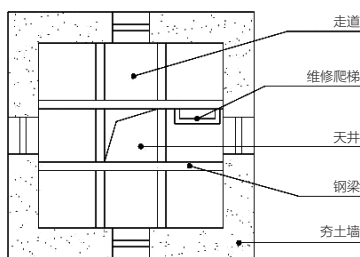
伴随着旅游业的发展，夯土碉楼被赋予了新的使用功能，如展览馆、博物馆、图书馆、客栈等<sup>[14]</sup>。活化利用可使碉楼保护工作逐步摆脱静态式建筑本体保护的局限，使碉楼保护由单纯的“输血模式”变为“输血模式”与“自我造血模式”并重<sup>[15]</sup>。夯土碉楼平面尺度较小，层数较多，结构承载力较低，需根据活化利用的建筑功能要求，对夯土碉楼提出安全合理的结构改造方案。

保护夯土碉楼历史信息的原真性是夯土碉楼活化利用的基本前提，结构改造方案要有可识别性，不可把原有的材料、构件和改造增加的材料、构件混淆起来。结构改造措施必须是可逆的(reversible)<sup>[12][13]</sup>，即这些措施可以拆除而不影响夯土碉楼本身。

#### 1 减轻楼面荷载的方案

此方案主要利用一层作为参观展示空间，二层及以上空间不上人，仅预留维修通道。如果原有楼面完好，楼面保留利用原有木梁和楼板。如果木楼面已经朽烂，则采用井字形钢梁替代原有木梁。井字型钢梁的端部固定在原楼面木梁在夯土墙上的插孔内，沿夯土墙设置走道和检修楼梯，走道和楼梯中间保留数层通高的天井(图15)。此方案在未增加夯土墙上部荷载的前提下，满足夯土碉楼的使用和维护要求；钢梁可以拆除而不影响夯土碉楼本身，满足可逆性的要求。

15 减轻楼面荷载的结构方案



#### 2 增加楼面荷载的方案

在需要充分利用各层空间的情况下，竖向荷载增加较多，此时，不应将增加的竖向荷载传递到夯土墙上，须额外设置竖向承重体系。

夯土碉楼内部空间有限，适合采用轻巧通透的钢框架体系。钢框架的基础需避开夯土墙基础，框架柱与夯土墙内壁距离按照走道宽度或单跑楼梯的梯段宽度控制。综合考虑上述因素，夯土碉楼内采用四柱框架，框架柱与夯土墙内壁之间的楼面由钢柱上的钢悬挑梁承托(图16)。钢框架柱采用桩基础，将钢柱的竖向轴力直接传递到地基土深部，不对原有的夯土墙地基产生附加压力。

钢悬挑梁端部的封口梁固定在夯土墙内壁上，钢框架与夯土墙共同承担风荷载及水平地震作用，形成内框外筒结构。楼板宜采用轻质楼板，减轻结构自重，此方案也可用于为开裂特别严重的夯土墙提供内部支撑。

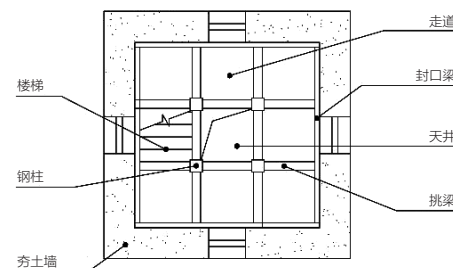
按照可逆性的要求，该新增的内部钢框架体系基础采用地螺钉，框架梁柱节点采用螺栓连接，基础和钢框架都可在不损伤夯土碉楼的情况下很快拆除。

### 四 结语

与砖砌墙体碉楼和钢筋混凝土墙体碉楼相比，夯土碉楼现状结构的安全隐患较多，改造利用的局限性较大。建议对夯土碉楼进行全面普查，分析总结夯土碉楼在结构安全上存在的共性和个性问题，制定加固和活化利用的技术实施细则，在保护碉楼建筑遗产价值的前提下，因“楼”施“策”，对破败情况严重的夯土碉楼实施抢救式保护，并提出活化利用的结构方案，为实现预防性保护争取时间和筹集保护资金。

尽管目前国内关于建筑遗产预防性保护的要求达到前所未有的高度，但对于生土建筑遗产的修复

16 增加楼面荷载的结构方案



与保护尚缺乏相关准则。在夯土碉楼修缮及活化利用的技术选择上，要充分认识到提炼传统夯土技术精华对于传统工艺技术传承、应用的重要性；在新材料、新技术的介入上，须注意最低限度干预和具有可逆性。研究希望在生土建筑遗产的修复与保护方面能起到抛砖引玉的作用，也希望通过有效的修缮保护及活化利用，使开平夯土碉楼能够长久与开平人民为伴，成为他们永久的精神家园。□

图片来源：图1引自文献[6]；图5引自文献[3]；图6引自文献[7]；其余图片均由作者拍摄或绘制。

#### 参考文献

- [1] 杜凡丁. 广东开平碉楼历史研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [2] 王立明. 开平碉楼中西交融建筑形式探讨[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [3] 张国雄. 开平碉楼[M]. 广州: 广东人民出版社, 2005.
- [4] 麦小麦. 开平碉楼[M]. 广州: 广东教育出版社, 2010.
- [5] ICOMOS. ICOMOS Charter - Principles for the Analysis, Conservation and Structure Restoration of Architectural Heritage (2003) Art.1.6[EB/OL]. [2020-04-12]. [https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/structures\\_e.pdf](https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/structures_e.pdf)/ ICOMOS CHARTER - PRINCIPLES FOR THE ANALYSIS, CONSERVATION AND STRUCTURAL RESTORATION OF ARCHITECTURAL HERITAGE.
- [6] 陈伟军. 开平碉楼结构特征研究[J]. 华中建筑, 2018(11): 147-151.
- [7] 余沛连. 心相·影像 开平碉楼[M]. 广州: 广东教育出版社, 2006.
- [8] 中华人民共和国国家文物局. 开平碉楼[M]. 北京: 中华人民共和国国家文物局, 2001.
- [9] 开平县华侨博物馆. 开平县文物志[M]. 广州: 广东人民出版社, 1989.
- [10] 王立明, 于莉. 开平碉楼屋顶形式设计手法探讨[J]. 华中建筑, 2008(12): 220-223.
- [11] 张万胜, 周宏梁, 唐天芬, 等. 开平碉楼修缮与保护研究[J]. 广东土木与建筑, 2011(10): 26-28.
- [12] 国际古迹遗址理事会(ICOMOS)中国国家委员会. 中国文物古迹保护准则[M]. 北京: 文物出版社, 2015.
- [13] 陈志华, 李秋香. 乡土建筑遗产保护[M]. 合肥: 黄山书社, 2008.
- [14] 李梦迪. 乡村振兴视角下世界文化遗产旅游开发路径研究——以“开平碉楼与村落”为例[J]. 旅游纵览, 2019(6): 116-117.
- [15] 张万胜. 开平碉楼活化利用探索——以自力村4座碉楼为例[J]. 五邑大学学报(社会科学版), 2019(8): 1-5.

收稿日期 2020-01-07  
编辑: 梁晓晨