

依山而建阶梯式地下室底板和顶板施工技术研究

史山山 梁 敏 徐恒杰 冯 鑫 刘海燕

中国建筑第七工程局 广东 深圳 518055

摘 要：依山而建阶梯式地下室面临复杂地基条件、差异沉降控制、结构抗浮与防水等多重技术难题，其底板与顶板施工是工程质量控制的关键环节。本文结合工程实践，系统分析阶梯式地下室的结构特点与施工难点，从地基处理、模板支撑体系、混凝土浇筑工艺、变形缝设置、防水构造等方面展开技术研究。

关键词：依山建筑；阶梯式地下室；底板施工；顶板施工；防水技术

引言：随着山地城镇开发建设推进，依山而建的建筑工程日益增多。受地形条件限制，此类工程往往采用阶梯式地下室结构以适应原始地形高差。与传统平地地下室不同，阶梯式底板的标高随山势呈台阶状变化，底板与顶板在不同高程面上形成错层布置，给地基处理、模板支设、混凝土浇筑及防水施工带来一系列特殊技术问题。本文从施工技术角度出发，系统研究依山而建阶梯式地下室底板与顶板的关键施工技术，分析其技术难点并提出针对性解决方案，旨在为类似山地建筑工程提供系统化的技术指导。

1 工程概况

项目位于深圳市南山区桃园街道深圳大学丽湖校区东北角，总用地面积 10695.61m²，总建筑面积约 68020.31m²，包含 3 栋住宅、2 层幼儿园、3 层裙房和 4 层地下室 (部分为半地下室)。

本项目依山而建，地下室底板和顶板结构布置呈阶梯形式，底板结构布置最大高差约为 9m，基坑支护形式主要为自然放坡及咬合桩支护。

依山而建阶梯式地下室施工场地狭小、地形起伏大、结构错层多、边坡敏感度高、高低落差作业密集，相较于平地地下室，其质量隐患隐蔽性强、安全风险等级高、施工管控难度大，根据地下室的特点及难点开展技术研究。

2 阶梯式地下室的结构特点与技术难点

2.1 结构形式与受力特征

依山而建阶梯式地下室顺应原始地形高差，将底板沿山坡方向划分为若干台阶，各台阶标高不同，相邻台阶通过垂直或倾斜挡墙连接。该结构形式可减少土方开挖量，并利用山体侧向约束增强整体稳定性。受力方

面，底板承受上部竖向荷载、山体侧向土压力及地下水浮力共同作用。各台阶处于不同高程，地基持力层差异大，基础沉降呈非均匀分布。顶板承受覆土荷载、使用荷载及山体滑坡推力，受力状态复杂。阶梯节点（台阶转换部位）存在应力集中现象，是结构设计与施工控制的关键区域。

2.2 施工技术难点分析

阶梯式地下室施工的主要技术难点有五方面。其一，地基处理难度大，挖方区与填方区交替分布，承载力差异显著，需差异化处理。其二，模板支撑体系复杂，阶梯状布置导致模板定位、加固及支撑高度变化大，传统体系难以直接应用。其三，混凝土浇筑质量控制困难，台阶阴角、阳角易产生蜂窝、麻面，高差大时存在离析风险^[1]。其四，变形缝与施工缝处理要求高，需合理设置以适应差异沉降和温度变形，止水带安装质量直接影响防水效果。其五，防水体系可靠性要求高，需抵御山体地下水侧向压力，底板和顶板防水层须具备较高抗水压能力和耐久性。

3 依山而建阶梯式地下室结构专项施工技术研究

3.1 高低差阶梯式底板分层浇筑与冷缝防控技术

阶梯式地下室底板存在多处高低差节点、折角截面，结构断面复杂、浇筑工作面不连续，传统整体一次性浇筑工艺难以实施，分段施工易产生施工冷缝、粘结不密实、节点渗漏等缺陷。本关键技术重点研究高低差底板分层、分段、错序浇筑工艺，优化浇筑分段界面位置、分层厚度、浇筑间隔时间，配套采用二次振捣、界面凿毛、水泥浆接茬处理工艺，有效规避冷缝质量缺陷。同时针对底板阴阳角、高低差搭接节点，优化防水加强层施工工艺，解决山地地下水渗流导致的节点渗漏难题，保障阶梯式底板整体防渗性能与结构整体性。

3.2 错层异形顶板支撑体系与应力控制技术

依山阶梯式地下室顶板呈高低错落、异形折板形态,结构受力不对称、局部应力集中明显,常规满堂架统一搭设方式刚度不均、稳定性不足,易造成顶板下沉、开裂、变形。本关键技术根据顶板高差分布、跨度变化、荷载差异,分区差异化设计模板支撑体系,对高落差、大跨度应力集中区域加密立杆、增设斜撑与水平拉杆,提升支撑体系整体刚度与稳定性。同时结合结构受力模拟结果,优化顶板钢筋排布、负弯矩区域加固工艺,控制混凝土浇筑速度与养护温差,有效释放、平衡错层顶板结构应力,防止顶板裂缝产生,提升异形顶板成型质量与结构耐久性。

3.3 阶梯式结构节点精细化构造施工技术

阶梯式地下室存在大量高差交接、梁板错层、墙体转折等异形节点,是施工质量薄弱点与渗漏高发部位。本关键技术针对各类异形节点开展精细化施工研究,优化错层位置钢筋贯通连接、节点模板定型加固、混凝土密闭浇筑工艺,杜绝节点漏浆、蜂窝麻面、钢筋偏移等质量缺陷。同时针对山地地下水丰富、山体渗流复杂的特点,优化高低差节点止水钢板、止水条安装工艺,完善节点多重防水构造,实现阶梯式地下室结构节点施工标准化、精细化,全面提升错层结构整体施工质量。

4 坡地地下室施工质量控制与安全防护技术研究

4.1 高低差结构差异化质量控制技术

针对阶梯式地下室分段错层、基面不平整、结构受力不对称的特点,建立适配多高程、多节点、异形结构的差异化质量控制技术体系。摒弃普通地下室统一化质量验收标准,针对坡地地基、高低差底板、异形顶板、错层节点分别制定专项质量管控参数。重点对地基压实度、承载力分区检测,对底板高低差接茬、施工冷缝、防水搭接、顶板钢筋锚固、梁板交接节点开展专项质量巡检。通过分区定标、分段管控、节点重点把控的方式,精准解决坡地错层结构易沉降、易开裂、易渗漏的质量通病,实现阶梯式地下室结构施工质量精细化控制。

4.2 山地隐蔽工序质量溯源与过程管控技术

坡地地下室土方开挖、地基处理、防水铺设、节点加固等工序多为隐蔽工程,受地形遮挡、工作面受限影响,常规巡检难以全覆盖,极易出现工序偷漏、施工不规范、验收不到位等问题。本技术采用“工序报验+全程记录+节点复核”的隐蔽工程管控模式,对基底处理、钢筋绑扎、止水构造、防水加强层等关键隐蔽工序

实行全过程跟踪验收。针对山地地下水动态变化特点,增加雨后基底复检、防水基层含水率检测、节点密封性复核等专项工序,杜绝隐蔽工程质量隐患,保障结构施工内在质量。

4.3 坡地基坑边坡稳定与多级支护防护技术

依山建设基坑边坡高差大、土体松散、渗流路径复杂,边坡滑移、局部坍塌风险远高于常规基坑。本关键技术依托咬合桩+预应力锚索组合支护体系,结合坡地地形特点优化支护桩排布、锚索倾角与张拉应力,适配倾斜岩面与不均匀土层受力特征。同时设置坡顶截水、坡面排水、坡脚加固三级排水防护系统,有效降低雨水入参与山体地下水对基坑边坡的软化扰动。通过静态支护加固与动态排水防护相结合,全方位提升山地深基坑边坡整体稳定性,规避基坑变形、局部滑塌安全事故。

4.4 高低差高空作业与狭小场地安全管控技术

阶梯式地下室施工存在大量临边、高差、悬挑、狭小工作面作业,高空坠落、物体打击、机械碰撞风险突出。本技术通过 BIM 模拟优化场地布置与施工动线,分区划分作业区域、设置刚性临边防护、封闭高空作业区域,杜绝交叉施工干扰。针对山地狭小场地材料堆放、机械行走、人员作业制定专项安全管理细则,配套落实班前安全技术交底、高危工序旁站管理、常态化隐患排查制度,实现山地复杂场地施工安全标准化、常态化管控。

5 防水与变形控制关键技术

5.1 底板综合防水体系

阶梯式地下室底板采用“结构自防水+柔性外防水”两道防线。结构自防水方面,混凝土抗渗等级不低于 P8(强透水地层不低于 P10),掺入抗裂防水剂,水胶比不大于 0.45。变形缝、施工缝处设置钢板或橡胶止水带,安装须居中平顺,搭接处热硫化连接。柔性外防水层选用预铺反粘型高分子自粘卷材,铺设在底板垫层上,搭接宽度不小于 100 毫米。台阶阴角、阳角处铺设宽度不小于 300 毫米的附加层。

5.2 顶板防水与排水构造

顶板防水采用“涂料+卷材”两道设防。底层为 2.0mm 厚非固化橡胶沥青防水涂料,最上层为 3.0mm 自粘聚合物改性沥青防水卷材(PY 类)。台阶转折处、管道穿板处、变形缝等节点部位设置防水加强层。顶板排水是保证防水效果的重要环节,在防水层上部设置排水板或卵石排水层,将渗漏水有序排向台阶低处的排水暗沟。覆土顶板须在排水层上方铺设土工布过滤层,防

止泥土堵塞排水通道。顶板边缘与山体交接处设置截水沟,拦截地表径流,减少对地下室外墙的水压力。

5.3 变形缝与施工缝处理

阶梯式地下室需合理设置变形缝释放温度应力和不均匀沉降。变形缝间距控制在 30 至 40 米,宜设在台阶转折处附近。采用中埋式橡胶止水带加外贴防水卷材的组合构造,止水带中心线与缝中心线偏差不超过 10 毫米。沉降变形缝内填充低密度聚乙烯泡沫板,缝口嵌填密封胶。施工缝应设在受力较小且便于施工的部位,水平施工缝宜设在底板以上 300 毫米侧墙处,采用阶梯缝或凹槽缝形式,并设置 3 毫米厚、300 毫米宽钢板止水带。浇筑上层混凝土前,对施工缝表面凿毛处理,清除浮浆和松动石子,涂刷界面处理剂,再用同强度水泥砂浆铺底。

6 施工监测与质量控制

6.1 差异沉降动态监测

阶梯式地下室各台阶差异沉降是重点监控指标。在每个台阶四角和转折处布设预埋不锈钢测钉作为沉降观测点。监测频率:地基处理后测初始值;底板浇筑后每 3 天一次;顶板施工期间每 2 天一次;结构封顶后每周一次,直至沉降稳定(连续两次沉降差小于 0.04 毫米/天)。监测数据及时整理,绘制沉降-时间曲线。当某台阶沉降速率异常或相邻台阶差异沉降超过预警值(一般为 0.05% 相邻台阶间距)时,立即暂停施工,分析原因并采取措施,如调整施工顺序、加强地基注浆等^[4]。

6.2 模板支撑体系监测

在支撑体系关键部位(台阶节点下方、大跨度区域)布设位移和轴力监测点。位移监测采用全站仪或激光测距仪,测量立杆水平位移和竖向沉降;轴力监测采用振弦式轴力计,安装在受力较大的立杆顶端。监测频率:浇筑前测初始值,浇筑过程中每 30 分钟一次,浇筑后 2 小时内每小时一次。位移预警值:水平位移 15 毫米或竖向沉降 10 毫米。监测值超限立即停止浇筑并加固。

拆模前对同条件养护试块进行抗压试验,确保混凝土强度达到设计要求的 75% 以上。

6.3 混凝土裂缝与渗漏检查

裂缝检查采用裂缝测宽仪和目测相结合,重点检查台阶阴角、阳角、变形缝周边、预留孔洞四周等应力集中区域。宽度小于 0.2 毫米的非贯穿裂缝采用表面封闭法涂刷环氧树脂胶;0.2 至 0.3 毫米裂缝采用低压注浆法灌注改性环氧树脂;超过 0.3 毫米或贯穿性裂缝需进行结构评估后处理。渗漏检查采用蓄水试验(底板蓄水深度不低于 50 毫米)或淋水试验(顶板不少于 6 小时)。发现渗漏点后标注位置、分析原因(混凝土不密实、止水带破损、施工缝处理不当等),采用注浆堵漏或重新铺设防水层处理。

结束语

依山而建阶梯式地下室底板与顶板施工技术是山地建筑质量控制的核心环节。本文系统分析了阶梯式地下室的结构特点与技术难点,从地基处理、模板支撑、混凝土浇筑、防水构造及施工监测等方面提出了针对性技术措施。研究表明,采用台阶分区地基处理、分段跳仓浇筑、综合防水设防及动态施工监测等成套技术,可有效控制结构变形与裂缝,确保工程质量。随着山地城镇建设持续推进,相关施工技术仍需在实践中不断完善和创新。

参考文献

- [1] 杨晶. 地下室底板高分子自黏胶膜防水卷材预铺施工技术[J]. 河南建材,2025(10):93-95.
- [2] 林萍萍. 建筑地下室底板后浇带施工技术刍议[J]. 居业,2025(11):73-75.
- [3] 陈雷雷. 复杂地质条件下地下室大体积底板防裂施工控制技术研究[J]. 砖瓦,2024(6):112-115.
- [4] 曾刚. 某超高层建筑地下室顶板临时加固技术探索与应用[J]. 四川建筑,2023,43(2):261-265.