

山地复杂地形条件下建筑结构选型与设计研究

文 / 许楠 中船第九设计研究院工程有限公司

摘要：山地复杂地形条件下的建筑结构选型与设计面临高差悬殊、地质脆弱及生态敏感等多重挑战。本文以“地形顺应性”为核心设计思路，提出系统性设计方法：通过三维地质模型，构建分区响应的结构选型策略，在建筑方案阶段确保土方平衡；合理利用支护、结构空腔、生态护坡等多种形式，满足水土保持、低碳发展要求；采用 BIM 与 CFD 工具优化抗风抗震性能，形成刚柔并济的灾害韧性体系。计算表明，该设计方案可显著提高山地复杂地形条件下建筑的安全性。

关键词：山地建筑；复杂地形；结构选型与设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.096

引言

随着城市化进程加快，山地复杂地形逐渐成为城市建筑开发的重要方向。然而，山地地形特有的高差起伏、地质条件多变、生态环境敏感等特点，对建筑结构选型与设计提出了严峻挑战^[1]。传统建筑模式难以适应复杂地形下的力学稳定性、空间协调性和生态可持续性要求，导致建设成本增加、施工风险上升，甚至引发地质灾害。因此，如何通过科学的结构选型与适应性设计实现山地建筑的安全、经济与生态平衡，成为当前工程领域的关键课题。本文将结合具体案例对山地复杂地形条件下建筑结构选型与设计方案进行研究。

一、工程简介

项目位于西南丘陵地带，总占地面积约 5.3 公顷，最大高差达 52m，场地内分布有 IV 类软岩、强风化带及局部滑坡隐患区，地震设防烈度为 7 度。基于地形勘测数据，项目需在有限开挖条件下实现 2.8 万 m² 综合体建设，涵盖商业、居住及公共设施功能。设计团队通过三维地质建模与 BIM 技术融合，根据实际地形因势利导确

定建筑、结构方案，合理采用空腔、支护、悬臂等多种结构手段，减少土方量 42%，降低边坡支护成本约 30%，实现了建筑效果。

二、项目地质特点

（一）地形分类

项目场地位于西南丘陵向山地过渡带，地貌单元可划分为陡坡区、缓坡区、沟谷区三类（详见表 1）。陡坡区集中分布于场地北侧及东南侧，占用地总面积 37%，坡面呈凸形或阶梯状，局部存在因风化剥蚀形成的冲沟，最大垂直高差达 52m，对建筑基底稳定性与土方平衡构成主要威胁；缓坡区占比 48%，坡向多变，表层覆盖层厚度 0.5 ~ 3.2m，存在浅层滑移风险；沟谷区占 15%，地势低洼且常年受季节性流水侵蚀，地下水位埋深仅 1.8 ~ 4.5m，地基承载力普遍低于 80kPa。三类地形中，陡坡区因岩体破碎需采用分级支护，而沟谷区因软土分布广泛，岩面起伏较大，局部岩体出露，成为基础设计难点区域。

表 1 地形分类及特征

地形类型	坡度范围	面积占比	典型地形特征	主要工程挑战
陡坡区	> 25%	37%	凸形坡、阶梯状冲沟	边坡稳定性差、土方开挖难度大
缓坡区	10% ~ 25%	48%	多坡向、浅层覆盖	地基不均匀沉降、浅层滑移
沟谷区	< 10%	15%	低洼积水、软土沉积	承载力不足、岩面起伏大

（二）工程地质条件

场地地层（详见表 2）自上而下依次为：①第四系残坡积层，厚度 0.5 ~ 5.0m，以黏土夹碎石为主，天然含水率 18% ~ 27%；②断层破碎带，厚度 3 ~ 5m，

充填黏性土夹角砾。③强风化泥岩，厚度 3 ~ 8m，遇水易软化。④中风化砂岩夹泥岩，较完整，岩石单轴抗压强度 5.2 ~ 8.8MPa；地震动峰值加速度 0.1g，场地类别为 II 类。

表 2 工程地质条件简述

地层编号	岩性描述	厚度 (m)	压缩模量	抗压强度 (MPa)	工程问题
①	黏土夹碎石	0.5 ~ 3.0	3	-	承载力低
②	断层破碎带	0 ~ 8	8	-	桩基易塌孔
③	强风化泥岩	1 ~ 5	-	-	遇水软化、易崩解
④	中风化泥岩	>15	-	5.2 ~ 8.3	岩体较完整

三、结构方案概述

项目场地高差最大 52m，结构选型需兼顾安全性、经济性与环境适应性。针对陡坡区的基底悬空风险与开挖限制，根据建筑方案分别采用掉层结构、悬臂桁架等不同结构体系。对于沟谷、缓坡区，结合地形起伏，在建筑方案上采用台阶式逐步消化竖向高差，结构方案根据地质条件分别采用结构架空、放坡、支护等多种形式，一方面确保土方平衡，一方面尽量减少高大支护结构。

四、建筑结构的设计

(一) 陡坡区典型单体结构设计

陡坡区坡顶根据规划设有悬臂商业，亦作为主要观光点可俯瞰整个地块全貌，悬臂商业主体结构采用钢框架结构，因临近山体边，根据场地地质情况，基础采用桩基础，边桩到坡面边缘距离由桩端到坡面距离和桩端到坡脚的角度确定。再根据三维地质扫描建模，结合 BIM 技术，方案阶段即可确定视觉悬挑效果和最大悬挑长度，悬臂段采用钢桁架结构。整体计算时考虑竖向地震作用，并补充悬臂段楼板舒适度分析。

陡坡区靠近坡脚位置设有高层酒店，酒店总高度 50m，共首层层高 6m，二~十二层层高均为 4m，平面较规则，一般柱网为 8m×8.4m，主体结构采用框架剪力墙

结构。根据交通组织设计，酒店首层主入口与半坡处市政道路相接，酒店次入口位于坡脚，可通向缓坡区。根据建筑功能要求，平面宽度共 5 跨，其中 3 跨位于在高标高平台，2 跨设掉层结构坐落在低标高坡脚，掉层结构两相邻接地端高差 6m，边坡与主体结构脱开设计。偏保守考虑，结构高度取下接地嵌固端。上接地端设置与掉层部分连接的现浇梁板式接地楼盖，掉层结构上接地层竖向构件重要性系数按 1.1。

(二) 缓坡区及沟谷区典型单体结构设计

缓坡区及沟谷区场地地形大体为自南向北逐渐降低，场地自东向中部逐步降低至沟谷，向西又逐步抬高，总体规划方案结合地形主要呈现为自南向北逐级设平台+台阶的形式，如下图 1，故东西侧标高较高处主要为挖方区，中部沟谷主要为填方区，通过合理设置竖向设计，实现土方挖填平衡。对于填方区、挖方区，根据场地现状、单体使用功能，分别对比支护、结构架空等结构形式，选取合理的结构布置，填方区设桩板+锚索挡墙成本较高，设置结构架空后可减少回填，取消支护结构，架空区可作为汽车库使用；挖方区一般可设锚索挡墙，根据规划面积限制，也可采用局部架空，见图 2、3。局部较缓区域采用自然护坡。

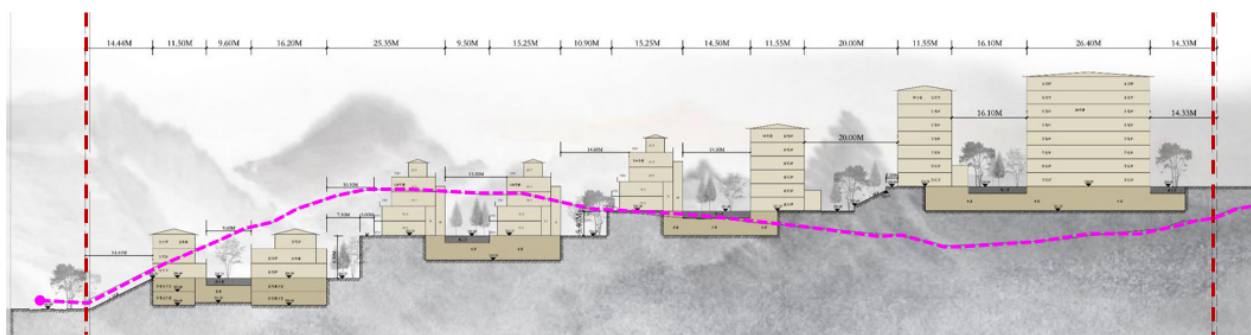


图 1 建筑方案竖向设计示意

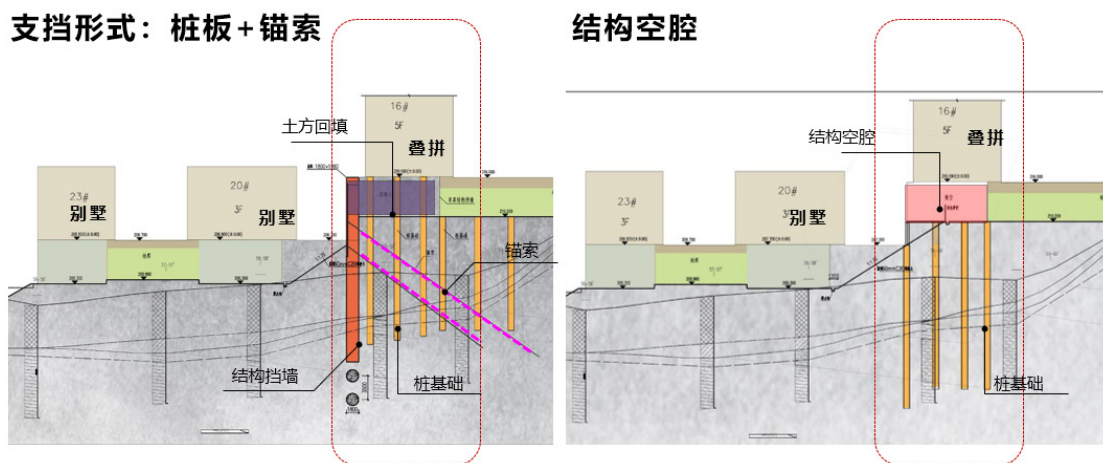
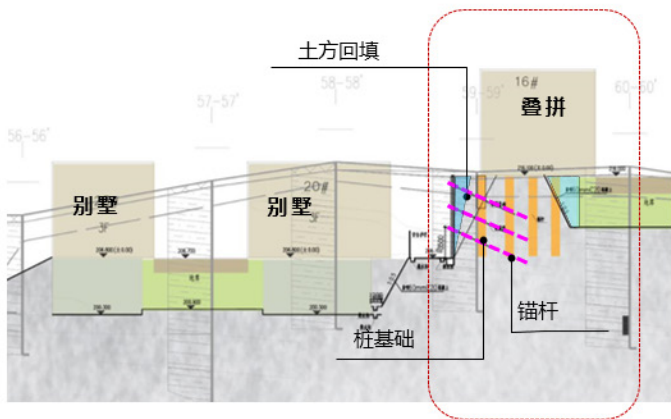


图 2 填方区车库朝低标高侧临空

支挡形式：锚杆



结构空腔

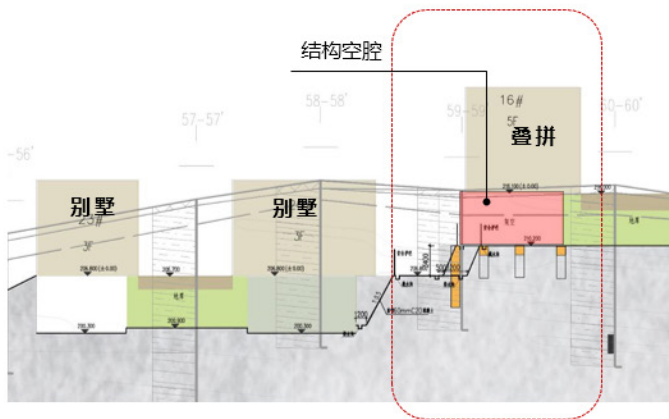


图3 挖方区车库朝低标高侧临空

(三) 基础设计

各结构单元基础持力层选择中风化泥岩，因场地竖向高差大，持力层也有较大起伏，对于持力层位于场地标高3m以内时，基础采用独立基础，基础计算厚度至持力层顶面之间采用C30混凝土浇筑密实。持力层低于场地标高3m以下时，基础采用钻孔灌注桩，部分单体同一结构单元局部采用浅基础，局部采用桩基础，因持力层均为中分化泥岩，沉降差能够满足需求。

五、山地复杂地形条件下建筑结构选型与设计经验总结

(一) 因地制宜，选型有道

山地建筑结构选型与设计需以地质适配、功能引导、生态协同为核心逻辑，采取因地制宜的设计思路^[2]。首先，要强化地形分析，建议通过三维地质建模与等高线解析，明确陡坡、沟谷、断层等关键区域的力学边界，避免“先设计后补救”的被动模式。其次，场地竖向设计，结构专业应在方案阶段提供专业意见，根据土方挖、填区要采取不同应对策略，对土方开挖、回填和支护设计进行经济学必选。

(二) 量势而建，顺势而行

山地建筑结构选型与设计要将地形特征作为设计方案的一部分，设计者应深入解析场地地貌与地质条件，识别陡坡、沟谷、山脊等关键地形单元的空间关系与力学特性，避免“削山填谷”式的粗放干预^[3-4]。首先，在布局层面，建议采用“分台错落、体量消解”策略，例如将建筑体量通过设结构缝拆解为多个标高平台，顺应等高线走向，利用连廊、悬挑等手法衔接高差，也可根据建筑功能需求，设置掉层结构、吊脚结构。其次，对于陡峭坡地，可优先选用轻质悬挑结构或架空体系，通过局部桩基锚固于稳定岩层，弱化建筑对地形的压迫感。

(三) 结合实情，优化设计

山地建筑设计的核心在于立足场地实情不断优化设

计方案，设计者需摒弃“模板化”思维，以问题为导向，选择最佳设计方案^[5]。以下提供几个参考：其一，强化多专业协同分析，建议整合地质、水文、生态等多源数据构建场地数字孪生模型，例如通过BIM+GIS技术模拟不同标高区域的力学响应与施工可行性，避免因信息割裂导致的后期返工。其二，采用弹性设计框架，针对山地环境的不确定性，应在结构体系中预留可调节余量，例如通过滑动支座、可拆卸节点等灵活构造适应地基变形，或利用轻质高强材料降低荷载敏感度。其三，注重全周期成本优化，建议在方案阶段即纳入施工工艺与运维成本评估，例如优先选择预制装配技术减少山地运输难度，或通过覆土建筑与植被屋面降低长期能耗。

结语

山地复杂地形条件下的建筑结构选型与设计是一项融合地质工程、生态理念与技术创新的系统性课题。本研究所提出的因地制宜结构选型策略可显著优化山地建筑结构安全性，同时提高资源的利用效率。未来研究需进一步关注智能化监测技术与自适应结构体系的开发，以应对极端气候与地质活动的叠加风险。

参考文献

- [1] 马朝军. 山地商业设计的策略要点——以阆中水城商业水街项目为例[J]. 居舍, 2025, (06): 105-108.
- [2] 朱直旺. 山地住宅建筑规划设计[J]. 江苏建材, 2024, (06): 83-84.
- [3] 田晓雨. 重庆龚滩旅游度假区游客综合服务中心建筑设计[J]. 建筑技艺(中英文), 2024, (S2): 18-19.
- [4] 王心怡. 云龙山综合服务中心建筑设计[J]. 建筑技艺(中英文), 2024, (S2): 48-49.
- [5] 李旺. 山地中医医院建筑设计的在地性策略——以屏南县中医医院建设项目为例[J]. 福建建设科技, 2024, (06): 19-22.