

岩溶地质条件下基建项目风险识别与防控策略分析

陈珍元

北京中集大房工程管理有限公司广州分公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ADA.2025020049

摘 要 : 文章以白云机场三期扩建工程周边临空经济产业园区基础设施建设项目为研究对象, 通过分析项目岩溶地质特征及施工全过程风险数据, 识别地基稳定性、结构安全、防水渗漏等核心风险。结合 TIS 机构风险评估与过程检查结果, 从地质勘察、设计优化、施工管控、监测预警、应急处置五个维度, 提出针对性防控策略, 为同类岩溶地质条件下基建项目的风险管控提供实践参考, 保障工程质量与长期运营安全。

关 键 词 : 岩溶地质条件; 基建项目; 风险识别; 防控策略

Analysis of Risk Identification and Prevention and Control Strategies for Infrastructure Projects under Karst Geological Conditions

Chen Zhenyuan

Beijing CIMC Dafang Engineering Management Co., Ltd. Guangzhou Branch, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This study examines the infrastructure construction project for the aerotropolis industrial park surrounding the Phase III expansion of Guangzhou Baiyun International Airport. By analyzing the karst geological characteristics and construction-process risk data, it identifies core risks including foundation stability, structural safety, and waterproofing/seepage. Integrating TIS institutional risk assessments and process inspection outcomes, targeted prevention strategies are proposed across five dimensions: geological investigation, design optimization, construction control, monitoring and early warning, and emergency response. This provides practical guidance for risk management in infrastructure projects under similar karst geological conditions, ensuring engineering quality and long-term operational safety.

Keywords : karst geological conditions; infrastructure projects; risk identification; prevention strategies

引言

岩溶地质是碳酸盐岩等可溶性岩石经水侵蚀形成的特殊地质形态, 广泛分布于我国华南、西南等地区。此类地质条件下, 溶洞、土洞、地下暗河等不良地质体发育, 给基建项目的地基基础施工、主体结构安全及长期运营带来诸多挑战。白云机场三期扩建工程周边临空经济产业园区基础设施建设三期工程地处广州市花都区岩溶强发育区域, 施工过程中面临岩溶处理、地下水防控、结构裂缝等多重风险。

一、工程概况

本项目是白云机场三期扩建工程配套的重要基础设施项目, 项目总占地面积 333065.86 m², 总建筑面积 727597.05 m², 其中地上建筑面积 551921.25 m², 地下建筑面积 175675.80 m², 包含住宅、商业配套、学校、幼儿园、体育馆等多种功能业态, 共建设 83 栋建(构)筑物, 最高建筑高度 42.14m。项目地处岩溶强发育区域, 钻孔见洞隙率达 35.93%, 存在土洞、溶洞等不良地质体, 地下水类型包括孔隙水、岩溶(土)洞水和裂隙水, 对工程施工与结构安全构成显著风险, 是典型的岩溶地质条件下大型基建项目。

二、岩溶地质条件的工程特性分析

(一) 地质形态不规则且分布零散

岩溶地质的核心特征是可溶性岩石在水动力作用下形成的不规则地质体分布^[1], 本项目勘察结果显示, 场地内溶洞、土洞呈无规律分散发育, 无明显集中分布区域。土洞洞高 0.50 ~ 11.50m, 平均洞高 4.66m, 层面埋深 13.00 ~ 33.60m; 溶洞洞高 0.10 ~ 26.80m, 平均洞高 3.85m, 层面埋深 10.30 ~ 45.20m, 且多呈串珠状发育。这种不规则性导致地质勘察难以全面覆盖所有不良地质体, 部分隐蔽性岩溶构造在施工阶段才被揭露。同时, 岩溶顶板厚度差异较大, 且普遍存在溶蚀现

象,岩石完整性差,无法直接作为桩端持力层,给地基基础选型与施工带来极大挑战。

（二）水文地质条件复杂且动态变化

本项目场地地下水类型多样,孔隙水、岩溶（土）洞水和裂隙水相互连通,形成复杂的水文网络。实测地下稳定水位埋深0.80~6.00m,年变化幅度1~3m,且与周边地下水系统互补补给,水位动态变化复杂。地下水对混凝土结构及钢筋具有微腐蚀性,长期作用可能影响结构耐久性。

（三）工程建设适宜性差且风险叠加

根据《城乡规划工程地质勘察规范》,本项目场地稳定性评级为“稳定性差”,工程建设适宜性级别为“适宜性差”。场地虽无活动断裂、滑坡等重大地质灾害,但岩溶（土洞）作为主要不良地质作用,与地下水影响相互叠加,形成多重风险。岩溶顶板强度不足、充填物稳定性差,在施工荷载与地下水作用下易发生坍塌;土洞顶板多为粉质黏土及砂层,强度低、抗冲刷能力弱,易因地下水渗透而扩大,引发地面沉降。同时,场地属于建筑抗震不利地段,软弱土与岩溶地质的组合的作用,进一步增加了结构抗震设计的难度。这种风险叠加效应使得项目从勘察、设计到施工、运营的全生命周期都面临较高的技术风险,对工程质量与安全控制提出严格要求。

三、岩溶地质条件下基建项目风险识别与防控的难题

（一）地质勘察精度不足,风险预判难度大

岩溶地质的隐蔽性与复杂性导致传统勘察手段难以全面准确揭示地质条件^[9]。本项目在615个勘察钻孔中发现221个钻孔存在溶（土）洞,但仍无法排除未勘察区域存在隐蔽岩溶构造的可能。勘察过程中,岩溶洞体的高度、充填情况、顶板厚度等关键参数难以精准测定,部分串珠状溶洞易被遗漏,导致地质勘察报告难以完全反映场地真实地质状况。此外,地下水的动态变化特性使得勘察期间测得的水位数据难以代表长期稳定状态,给抗浮设计、防水方案制定带来不确定性。

（二）地基基础设计适配性不足,结构安全风险突出

在岩溶发育地质条件下,地基基础设计需同时应对不均匀地基承载力、岩溶坍塌、地下水侵蚀等多重挑战。本项目设计虽采用勘察报告建议的管桩+承台基础方案,但该方案在具体地质条件下仍显适配性不足,主要体现于以下两方面:

其一,岩溶特殊地质导致桩基施工质量与承载力难以保证。场地内基岩面起伏大、坡度陡,且下伏岩层局部较破碎,导致工程桩桩长差异悬殊。施工中易出现桩端持力层选择失误(如落在不稳定溶洞顶板或充填物上),或因岩面倾斜引发桩身滑移。更严重的是,此类地质条件极易在施工中产生断桩、短桩、桩身偏位等严重缺陷,形成大量Ⅲ类甚至Ⅳ类桩,其单桩承载力与沉降控制均无法满足设计要求,对整体结构安全构成直接威胁。

其二,上部结构设计未能充分考虑地基的不利影响。施工过程中发现,部分短肢剪力墙配筋率不足、地下室梁板配筋小于计算值,不符合《高层建筑混凝土结构技术规程》要求。在地基可

能存在不均匀沉降的风险下,上部结构配筋的薄弱环节将进一步放大结构的安全风险。

（三）施工技术难度高,过程管控风险大

岩溶地质的强不确定性与高扰动性,给本项目施工带来了远超常规工程的系统性挑战。在桩基施工阶段,虽已完成溶洞处理钻孔超六百个,但复杂的地下环境导致施工风险高度集中且相互关联:钻孔穿越多层溶洞时,不仅频繁遭遇漏浆、塌孔,更易因岩面倾斜、溶洞内探头石或坚硬异物导致“卡钻”、“埋钻”等恶性事故;浅层溶（土）洞在钻进扰动或地下水动力条件改变后,可能引发作业面局部塌陷,导致桩机倾覆或陷机,严重威胁人员与设备安全;相邻桩孔若处于连通性良好的溶洞系统中,极易出现“串孔”现象,造成混凝土流失和成桩失败。在上述恶劣的成孔条件下,钢筋笼难以安放到位,混凝土灌注时易通过溶洞裂隙流失,导致桩身混凝土离析、夹泥、断桩等严重缺陷,产生大量影响承载力的Ⅲ类、Ⅳ类桩,直接动摇结构安全基础。同时,岩溶发育区的地下承压水构成持续威胁:基坑开挖或桩孔钻进若意外揭穿承压水囊,可能引发高压水夹带泥沙的突涌事故,不仅淹没作业面、冲毁桩孔,更会加剧周边地面沉降。

（四）监测预警体系不完善,风险响应滞后

岩溶地质条件下,基建项目需建立覆盖地质、结构、地下水的全方位监测体系,但实际工程中监测预警存在诸多不足。本项目虽进行主体结构沉降监测,且沉降趋势正常,但针对岩溶发育、地下水水位变化的专项监测不够全面。部分监测指标设置不合理,未能及时捕捉岩溶顶板变形、土洞扩张等关键风险信号。监测数据的分析与应用不足,未能建立实时预警机制,导致部分风险隐患未能及时发现,如地下室渗漏问题在雨后查勘时才新增多处渗漏点。此外,监测频率与施工进度匹配度不足,在桩基施工、基坑开挖等关键阶段,未能加密监测频次,风险响应滞后。岩溶地质条件下的工程安全高度依赖于建设、设计、施工、监理及TIS(第三方独立巡查)机构的高效协同与信息互通。然而,本项目技术信息共享存在迟滞与脱节,典型表现为地块17、18的岩土工程详细勘察报告与关键的结构设计计算书未能及时提供给TIS等单位,致使风险评估的基础依据不足,影响了预判和管控的精准性。

四、岩溶地质条件下基建项目风险识别与防控的解决措施

（一）优化地质勘察方案,提高风险预判精准度

为从根本上控制岩溶地质风险,须采用超前、综合的勘察手段,构建覆盖场内外风险预判体系。首要措施是实施“点-面结合”的精细化勘察:在常规勘察基础上,于岩溶强发育区实施“一桩一孔”或更密的加密钻探,精确揭示桩位下溶洞分布与充填情况。其次,强化物探与钻探的协同验证,运用高密度电法、地震波CT等技术立体扫描隐伏构造,弥补钻探局限。同时,必须高度重视场地外围岩溶稳定性调查与地下水长期监测,评估邻区岩溶发育及水力联系,防范“邻域塌陷”风险,并为抗浮与防水设

计提供动态数据支撑。最后，建立贯穿施工全过程的地质信息动态更新机制，利用桩孔摄像等技术及时捕捉未探明岩溶构造，启动应急补勘并反馈设计，实现从“被动应对”到“主动预判”的管控模式转变。

（二）强化设计优化，提升结构适配性

针对岩溶地质特性，结构设计需采取系统性优化以提升适配性。在地基基础方案选择上，除常规管桩外，对于溶洞强烈发育区应论证采用桩筏基础，利用其整体刚度跨越局部缺陷；对浅层岩溶可考虑 CFG 桩复合地基处理。本项目管桩基础须通过施工勘察精准控制持力层，并着力增强基础整体刚度，通过加大基础梁、增厚筏板及采用变刚度调平设计（即在荷载大的部位加密布桩）来主动调节差异沉降^[9]。上部结构应对短肢剪力墙、地下室梁板等关键部位严格按规范计算并适当提高构造配筋，增强结构抗变形能力。防水体系应以 P8 及以上防水混凝土为根本，结合多道柔性防水层，并对施工缝、穿墙管等节点进行专项密封强化，形成与岩溶地质条件相匹配的耐久性防护体系。

（三）系统性风险控制与质量保障措施

在桩基施工前，必须实行“一桩一探”的超前钻探，精确探明桩位处溶洞分布与水文条件，并对浅层溶（土）洞优先采用压力注浆进行填充加固，从源头稳定地基。施工过程中，需动态调整工艺以应对复杂情况，包括现场备足优质泥浆与钢护筒以应对漏浆与塌孔，遇大型溶洞时果断采用钢护筒跟进或回填冲砸工艺，针对岩面坡度大、溶洞连通性好的区域严格实施跳打施工以防治串孔。在成桩质量把控上，须采用低应变法与声波透射法对桩身进行全数普查，对检出的 III、IV 类桩严格依据其缺陷类型与位置，采用高压注浆补强、补桩或承台扩大等方案进行可靠加固。针对地下水与防水难题，应遵循“以堵为主、疏堵结合”的原则，在基坑开挖前可沿外围施作高压旋喷止水帷幕以阻断岩溶水补给，降水时实施信息化动态控制，并在敏感区域布设回灌井以减少周边沉降^[4]。在结构防水方面，必须确立以结构自防水为根本的理念，通过采用抗渗等级不低于 P8 的补偿收缩混凝土并优

化配合比与养护来提升混凝土自身抗裂防渗性能，同时对所有施工缝、后浇带、穿墙管等关键节点进行多道设防与专项密封强化处理，以构建可靠的全体系防水系统。

（四）构建全方位监测预警体系，提升风险响应速度

建立覆盖地质、结构、地下水的全方位监测预警体系。监测内容方面，增设岩溶顶板变形、土洞扩张、地下水水位与水质变化等专项监测指标，结合主体结构沉降、倾斜监测，形成完整的监测指标体系。监测方法上，采用自动化监测设备，如光纤光栅传感器、自动化水位计等，实现监测数据实时采集与传输。建立监测数据分析平台，运用大数据技术对监测数据进行趋势分析与风险预判，设置预警阈值，当监测数据超出阈值时自动报警。优化监测频率，在桩基施工、基坑开挖、防水施工等关键阶段加密监测频次，确保及时捕捉风险信号^[9]。加强监测成果应用，将监测数据与施工进度同步分析，及时调整施工方案，提升风险响应速度。搭建统一的数字化协同管理平台，实现勘察、设计、施工、TIS 等多方数据的实时上传与共享，确保 TIS 等单位可随时调阅最新版本的技术文件。明确 TIS 单位的技术质询权，规定其在未及时获取必要技术资料时，有权向建设方提出正式书面质询并可暂停相关风险评估工作，直至资料完备。

五、结束语

岩溶地质条件下的基建项目风险识别与防控是一项系统工程，涉及地质勘察、设计、施工、监测、协同管理等多个环节。本文以白云机场三期扩建工程配套项目为案例，分析了岩溶地质形态不规则、水文地质复杂、工程适宜性差的核心特性，识别出勘察精度不足、设计适配性不够、施工管控难度大、监测预警不完善、多方协同不足等关键难题。通过优化勘察方案、强化设计适配、创新施工技术、构建监测体系、完善协同机制等针对性措施，可有效提升岩溶地质条件下基建项目的风险管控水平。

参考文献

[1] 何高峰, 罗先启, 范训益, 等. 南宁地铁2号线岩溶风险分析和处理原则 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62(5): 86-90.
[2] 叶扬春. 岩溶地层邻近建筑物盾构隧道施工风险评估及控制研究 [D]. 广西: 广西大学, 2022.
[3] 段运启, 疏义广. 浅覆盖型岩溶地质条件下明挖隧道深基坑工程设计 [J]. 工程建设与设计, 2020(17): 41-42, 45.
[4] 杨祉惠, 雷刚, 成双田, 等. 岩溶区域城市轨道交通控制保护区范围研究 [J]. 都市轨道交通, 2025, 38(3): 54-60, 107.
[5] 徐风雷, 王健. 岩溶地区大直径钻孔灌注桩施工关键技术及施工效率优化 [J]. 建筑机械, 2025(7): 63-68.