 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i7.11051

Study on Foundation Stability and Optimal Design of Urban Integrated Parking Lot in Karst Development Areas

Yaokuan Huang

Zhongmei Jiangnan Construction and Development Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510440, China

Abstract

The construction of urban integrated parking lots often faces engineering constraints due to karst geological conditions. Uneven spatial distribution of karst cavities, solution channels, and subsurface karst features leads to significant variability in bearing capacity, high exploration difficulty, and a high risk of differential settlement and localized instability. For urban integrated parking lot projects in karst development zones, this study systematically discusses the development patterns of karst geology and their impact mechanisms on foundation stability. A quantitative evaluation model for foundation stability is established, integrating factors such as karst roof thickness, cavity scale, rock mass RQD grade, and overburden load level. Using variable-weight fuzzy comprehensive evaluation theory, the model enables precise prediction of instability risks. Based on the evaluation results, differentiated selection strategies for end-bearing piles and friction-end-bearing piles are proposed, with an in-depth analysis of vertical load transfer mechanisms. Complementary reinforcement techniques—including permeation grouting, splitting grouting, and backfilling grouting—are applied, synergistically supporting the determination of bearing strata and foundation strengthening. Parametric analysis and engineering validation are conducted using ABAQUS finite element numerical simulation. The developed evaluation and design framework provides theoretical basis and technical support for urban integrated parking lot construction in karst regions.

Keywords

karst development; urban integrated parking lot; foundation stability; karst roof bearing capacity; foundation optimization design

岩溶发育背景下城市综合车场地基稳定性与基础优化设计研究

黄耀宽

中煤江南建设发展集团有限公司，中国 · 广东 广州 510440

摘　要

城市综合车场建设常面临岩溶地质条件的工程制约，溶洞、溶沟及隐伏岩溶空间分布不均匀，导致地基承载力离散性大、勘察难度高，极易引发不均匀沉降与局部失稳风险。针对岩溶发育区城市综合车场工程，系统阐述岩溶地质发育规律及其对地基影响机制，建立综合考虑岩溶顶板厚度、溶洞规模、岩体RQD等级及上覆荷载水平的地基稳定性定量评价模型，采用变权模糊综合评判理论实现失稳风险的精准预判。基于评价结果，提出端承桩、摩擦端承桩的差异化选型策略，深化竖向荷载传递机制分析；配套渗透注浆、劈裂注浆、充填注浆等分类加固工艺，持力层确定与地基加固处理相辅相成。采用ABAQUS有限元数值模拟进行参数化分析与工程验证，所构建的评价与设计体系可为岩溶地区城市综合车场工程建设提供理论依据与技术支撑。

关键词

岩溶发育；城市综合车场；地基稳定性；岩溶顶板承载力；基础优化设计

1 引言

以深圳龙城北综合车场工程为例，该项目位于深圳市龙岗区，总建筑面积约 13.8 万㎡，集 7 层停车楼与 27 层人才住房于一体，整体设 2 层地下室，最大柱荷载 40000kN。场地弱岩溶发育，灰岩见洞率 6.90%，相邻钻孔间灰岩顶板高差最大 31m，含角砾粉质黏土层上硬下软、均匀性差。施工中该层诱发 15 根灌注桩缩径，充盈系数降至 0.8~1.0，通过扩大钻头、包铁皮等工艺持续处理，最终保障桩基安全施工。这一典型案例充分说明岩溶背景下含角砾软弱土层对桩基施工质量的深刻影响，亟须建立科学的地基稳定性评价体系与相应的基础设计优化方案。。

2 岩溶发育特征与城市综合车场地基条件的工程地质分析

2.1 岩溶地质发育规律及空间分布特征

岩溶发育由岩性与地质构造及地下水共同控制，碳酸盐岩区域具备垂向分层与水平不均质特点，垂向溶洞多集中在地下水位波动带，洞体尺寸随深度增加逐步缩小，水平上断裂与节理密集带易形成溶蚀通道，相邻勘探孔揭露岩溶形

态差别巨大。溶洞与溶槽及石芽无序分布，短距离内持力层埋深起伏剧烈，岩土力学性质离散程度高，极大增加勘察与设计难度，各类岩溶形态对应的工程地质特征 [1]，如表 1 所示。

表 1 岩溶主要形态类型及工程地质特征

岩溶形态	发育特征	主要分布位置	工程地质影响
溶洞	封闭或半封闭空腔，充填状态多样	地下水位波动带	顶板失稳风险高，易引发地面塌陷
溶沟 / 溶槽	沿节理发育，深宽比差异大	基岩面附近	基础嵌岩面不均匀，桩端易偏斜
石芽 / 溶丘	残余突出岩体，顶面起伏剧烈	浅层基岩区	桩端支承条件差异大，施工难度高
土洞	上覆土体中的空洞，顶板薄	松散层底部	顶板承载力低，突然塌陷风险大

2.2 城市综合车场荷载特性与地基岩土力学特性

城市综合车场集停车，换乘与商业功能于一体，荷载特性具有显著的集中性与差异性，地下结构柱承受上部建筑传来的竖向集中荷载，单柱轴力通常达数千千牛，使桩顶受力远大于普通民用建筑，地下结构外侧还承受水土压力的侧向作用，导致基础整体受力状态较为复杂。在岩溶发育区地基岩土层的力学特性因溶蚀程度不同而呈现高度离散性：完整基岩单轴抗压强度可达数十兆帕，而溶蚀严重部位的顶板岩体因节理切割与充填物软化，承载能力大幅削减，使得地基面临不均匀沉降与局部失稳的双重风险，由此对桩基选型与桩位布置提出了更为严格的技术要求 [2]。

3 岩溶发育区地基稳定性定量评价方法

3.1 岩溶顶板承载极限状态与失稳判别准则

岩溶顶板承载极限状态分析是判别地基稳定性的核心环节，顶板通常简化为四边固支矩形板或圆形薄板模型，其极限承载力由板体弯拉强度与冲切强度共同控制。对于受均布荷载作用的圆形溶洞顶板，极限均布承载力按式（1）计算：

$$q_u = \frac{8M_u}{R^2}$$

式中：q_u 为顶板极限均布承载力（kPa），M_u 为顶板单位宽度极限弯矩（kN·m/m），R 为溶洞等效圆形半径（m）。失稳判别采用安全系数法，当顶板所受荷载效应 q 与极限承载力之比满足 $K=q_u/q\geq 2.0$ 时，顶板处于稳定状态，反之则判定为潜在失稳区域，须采取注浆加固或桩基绕避措施，安全系数阈值需结合岩体质量等级与荷载组合工况综合确定，不宜低于 2.0。

3.2 多因素耦合驱动的地基稳定性评价模型构建

岩溶发育区地基稳定性受多重因素交互影响，单一指标难以全面反映其真实状态，故须构建多因素耦合的综合评价模型，评价指标体系涵盖岩溶顶板厚度，溶洞跨径，顶板岩体 RQD 值与地下水活动强度及上覆荷载水平五个维度 [3]，各指标权重范围详见表 2。评价方法采用变权模糊综合评判理论，引入变权算子对静态权重实施动态修正，使某一指标趋于极端不利状态时其权重自动放大，从而有效规避常权法对极端因素的低估偏差，综合稳定性指数按式（2）计算：

$$I_s = \sum_{i=1}^{n} w_i(\boldsymbol{x}) \cdot r_i$$

式中：$w_i(\boldsymbol{x})$ 为第 i 项指标的变权权重，随各指标状态向量 x 动态调整，r_i 为该指标的单因素隶属度评判值，n 为指标总数。当 I_s 低于预设阈值时判定地基处于不稳定状态，须启动针对性加固处理程序（见表 2，见图 1）。

表 2 地基稳定性评价指标体系及权重范围

评价指标	指标含义	权重范围	不利判断阈值
顶板厚度	溶洞顶至地表的覆盖岩土厚度	0.25 ~ 0.35	（为溶洞跨径）
溶洞跨径	溶洞水平最大尺寸	0.20 ~ 0.30	
岩体 RQD 值	岩石质量指标	0.15 ~ 0.25	RQD<50%
地下水活动强度	地下水流速与水位变化幅度	0.10 ~ 0.20	水位年变幅 >3m
上覆荷载	基础底面附加压力	0.10 ~ 0.20	kPa

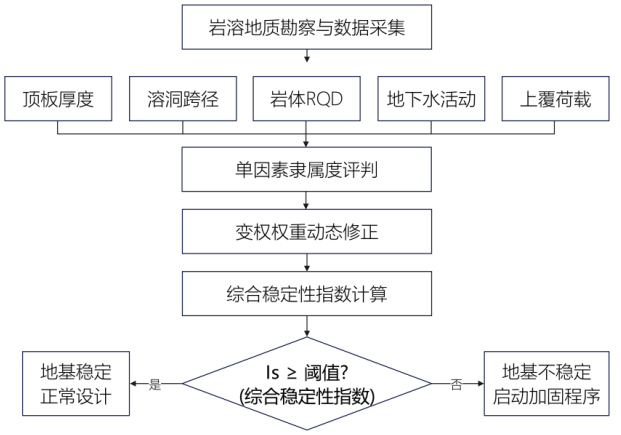


图 1 岩溶地基稳定性综合评价流程

4 城市综合车场基础优化设计

4.1 桩基类型选择与竖向荷载传递机制分析

岩溶发育区的桩基选型须兼顾地质不均匀性与荷载传递可靠性两方面的工程需求，当溶洞以下存在连续完整基岩持力层时，端承桩将桩端嵌入完整基岩，由岩体直接承担桩端荷载，从根本上规避溶洞顶板失稳的承载风险，当完整基岩埋深较大或溶洞密集导致嵌岩困难时，则采用摩擦端承桩，充分发挥桩侧摩阻力，同时对桩端附近溶洞实施注浆充填处理，以保证持力层的完整性 [4]。竖向荷载沿桩身向下传递的过程受多重因素制约。从浅部到深部，分别经历三个阶段：（1）浅层摩阻段，桩身穿过溶洞或破碎带时，粘聚力与摩擦角显著降低，单位长度侧摩阻力仅为 1-2 kPa，对竖向荷载传递贡献极小；（2）过渡强化段，桩身进入风化岩过渡带（距岩面 1-3m）时，岩体 RQD 值从 30% 逐步提升

至 60%，侧摩阻力线性增加，单位侧面周长单位长度摩阻力达 3-8 kPa；（3）完整基岩段，当桩端进入完整基岩（RQD ＞ 80%）后，端承力才达到设计值，嵌岩深度宜不小于 0.5 倍桩径且不少于 0.5m，同时要求桩岩界面粗糙度 JRC ＞ 4，保证端承力系数不低于 1.8，由此确保在千万量级荷载作用下桩基长期稳定性。当溶洞分布导致完整基岩埋深超过 6m 时，建议采用摩擦端承桩方案，充分激发桩侧过渡强化段的摩阻潜力。

4.2 岩溶地基加固处理的技术参数确定

注浆充填是岩溶地基加固处理中应用最为广泛的技术手段[5]，其技术参数须依据溶洞充填状态与规模及连通性分类确定，具体参数见表 3。对全充填型溶洞宜采用渗透注浆，注浆压力控制在 0.3 ～ 0.5MPa，对半充填或空洞型溶洞采用劈裂注浆或充填注浆，终压不低于 1.5MPa，浆液水灰比随溶洞类型在 0.5 ～ 1.2 范围内调整。注浆孔按梅花形或矩形网格布置，孔距根据浆液扩散半径确定，一般取 0.5 ～ 1.5m，加固效果须经注浆后检测孔取芯与压水试验共同验证，确保溶洞充填密实度与岩体渗透性均满足设计要求（见表 3，见图 2）。

表 3 岩溶地基注浆加固主要技术参数

溶洞类型	注浆工艺	水灰比	注浆压力（MPa）	孔距（m）	验证方法
全充填型	渗透注浆	0.5 ～ 0.8	0.3 ～ 0.5	1.0 ～ 1.5	取芯检查
半充填型	劈裂注浆	0.6 ～ 1.0	0.5 ～ 0.8	0.8 ～ 1.2	压水试验
空洞型（小）	充填注浆	0.8 ～ 1.2	0.8 ～ 1.2	0.6 ～ 1.0	取芯＋压水
空洞型（大）	充填＋骨料填塞	0.5 ～ 0.8	≥1.5	0.5 ～ 0.8	取芯＋超声检测

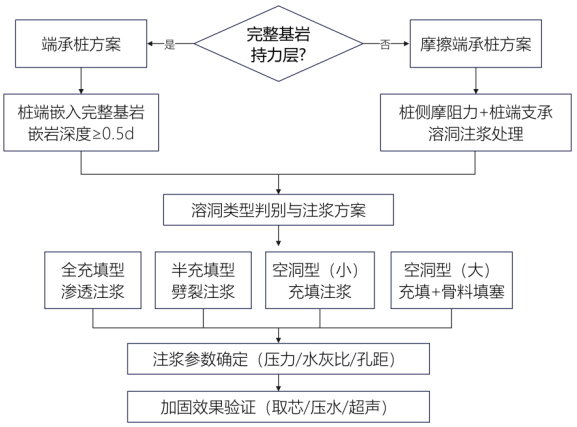


图 3 岩溶地基桩基选型与注浆加固技术路线

4.3 基础优化设计方案数值模拟与实际工程案例联合验证

数值模拟采用 ABAQUS 有限元软件构建含溶洞桩 - 岩耦合作用的三维模型，模型范围为 40m×40m×30m（宽 × 长 × 深），其中桩径 1.2m、嵌岩深度 0.5-3.0m 可变，溶洞采用球形或椭球形几何体表达，直径范围 3-12m，埋深 1-8m。岩体采用弹塑性 Duncan-Chang 模型，参数取值基于现场岩石标准贯入试验与单轴压缩试验反演，密集网格剖分单元尺寸 0.3m（桩周）至 1.5m（远场），共约 15 万个单元。加载采用位移控制法，顶部桩顶加载速率 0.01mm/step，总位移增量 5mm，以此获取桩顶沉降与轴力分布规律。参数化分析涵盖 6 个溶洞直径工况（3、5、7、9、11、12m）与 6 个顶板厚度工况（0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0m），共 36 个算例，开展参数化分析，探究溶洞跨径与顶板厚度组合对桩基受力性能的影响，计算结果显示溶洞顶板厚径比 h/d ＜ 1.5 时，桩端荷载极易造成顶板弯拉失稳，需采取注浆加固或桩基移位绕避措施，该结果与前文顶板失稳判别理论结论一致，选取深圳龙城北综合车场工程作为实例验证，该项目总建筑面积约 13.8 万㎡，整体设 2 层地下室，兼具停车换乘与住房功能，综合勘察等级甲级。场地弱岩溶发育，含角砾粉质黏土层上硬下软、局部流塑，为桩身缩径主要诱因。截至 2024 年 12 月，已施工桩中有 15 根出现缩径，135# 充盈系数 0.83、148# 为 0.82，111# 与 137# 经包铁皮后分别回升至 1.00 与 0.97，施工中持续扩大钻头至 1.64~1.86m，辅以超前钻探与分区注浆加固，证实差异化桩基处置技术对含角砾软弱层的良好适应性，为岩溶区同类综合车场桩基工程提供了直接参考。

5 结语

岩溶发育区城市综合车场地基稳定评价与基础优化设计，涵盖地质解析，力学判别及工程方案三大系统技术环节，明晰岩溶发育规律及其对地基的影响机制是稳定性分析的前提，依托岩溶顶板极限承载力理论与多因素耦合分析建立定量评价模型，可精准预判失稳风险，克服传统定性评价精度偏低的缺陷。基础设计需依据岩溶发育强弱选用适配桩基，并配套差异化注浆加固工艺，辅以有限元数值模拟校核，兼顾工程安全与造价平衡，岩溶场地工程应统筹地质勘察，稳定评价与基础设计，构建闭环成套技术体系，不可单一采用某项处置措施，伴随弹性波 CT 与变权模糊评判等技术迭代，岩溶工程设计精准度持续提高，为南方岩溶区域城市交通综合体建设提供完善理论与技术支撑。

参考文献

[1] 苏再非,周艳君.隐伏岩溶地基稳定性探测及评价指标的确定[J].矿产勘查,2024,15(S2):583-592.

[2] 胡雪雯,李云安,范志高.基于变权模糊综合评判理论的桩基下岩溶顶板稳定性评价[J].水文地质工程地质,2024,51(6):149-159.

[3] 温雅歌,刘金栓,尹泽鹏,盛靖昱.岩溶发育区某住宅项目基础及岩溶处理设计[J].中国岩溶,2024,43(5):1187-1195.

[4] 陈兆雄.岩溶发育区弹性波CT应用及桩基设计方法[J].南方能源建设,2022,9(S2):38-45.

[5] 夏涵.岩溶地区地质条件特征及地基基础评价[J].石材,2026(4):46-48.案例：http://gz.people.com.cn/BIG5/n2/2026/0326/c401347-41534557.html