

# 高层建筑岩土勘察分析及地基处理技术应用研究

胡海波

(贵州省有色金属和核工业地质勘查局六总队, 贵州 凯里 556000)

**摘要:** 当前高层建筑修建层出不穷, 岩土勘察及地基处理对高层建筑的安全性至关重要。文章以贵州省凯里市某高层住宅小区项目为例, 通过详细的岩土勘察, 确定了中风化白云岩作为桩基持力层的可行性。在此基础上, 采用泥浆护壁钻孔灌注桩技术进行地基处理, 并通过技术参数对比分析, 验证了其在承载力和沉降控制方面的优势。同时, 为进一步确保设计与施工效果的一致性, 进行了桩基静载荷试验。研究表明: 选择合理的勘察分析和地基处理技术能够显著提高地基承载力, 减少不均匀沉降, 从而保障建筑物的安全与稳定。本研究为复杂地质条件下的高层建筑地基设计与施工提供了科学依据和实践指导, 具有较为重要的工程应用价值。

**关键词:** 高层建筑; 岩土勘察分析; 地基处理技术; 技术应用

**中图分类号:** TU195; TU753

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-8993(2025)05-0048-07

**doi:** 10.13402/j.gcjs.2025.05.061

## Research on geotechnical investigation and foundation treatment technology application in high-rise buildings

HU Haibo

(Sixth Corps of Guizhou Provincial Nonferrous Metal and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau, Kaili 556000, Guizhou, China)

**Abstract:** Currently, high-rise buildings are built one after another, and geotechnical survey and foundation treatment are crucial to the safety of high-rise buildings. The article takes a high-rise residential community project in Kaili city, Guizhou province as an example. Through detailed geotechnical survey, the feasibility of weathered dolomite as a pile foundation holding layer was determined. On this basis, mud wall-guard drilling pile technology is used for foundation treatment, and its advantages in bearing capacity and settlement control are verified through technical parameters comparison and analysis. In order to further ensure the consistency between design and construction results, a pile foundation static load test was carried out. The research results show that: choosing reasonable survey and analysis and foundation treatment technology can significantly improve the foundation bearing capacity and reduce uneven settlement, thereby ensuring the safety and stability of the building. This study provides scientific basis and practical guidance for the design and construction of high-rise buildings under complex geological conditions, and has important engineering application value.

**Key words:** high-rise buildings; geotechnical investigation analysis; foundation treatment technology; technical application

随着城市化进程的加速, 高层建筑在城市发展中变得越来越普遍和重要。然而, 复杂地质条件对高层建筑的岩土勘察与地基处理提出了新的技术挑战。常见的复杂地质条件包括软土、红黏

土、岩溶及膨胀土等, 这些地质特性会导致地基的不均匀沉降、承载力不足及其他工程风险。因此, 如何在复杂地质条件下确保高层建筑的安全与稳定, 成为岩土工程领域的热点研究课题<sup>[1-3]</sup>。

**收稿日期:** 2024-08-17

**作者简介:** 胡海波(1991—), 男, 工程师, 从事岩土工程地质勘察方面的工作。

在复杂地质条件下，高层建筑的岩土勘察与地基处理技术面临诸多挑战，许多学者和研究团队对这一问题进行了深入研究，并提出了多种应对方案。例如，黄龙<sup>[4]</sup>提出了在复杂地质条件下，结合 CFG 桩和复合地基搅拌桩进行地基加固，同时通过土层换填技术处理松散土层，显著提高了软弱土层的承载力和稳定性，特别是在风化页岩等特殊地质环境中的应用效果良好。陈启贵<sup>[5]</sup>在勘察过程中强调了原位测试和动力触探的联合使用，能够更精准地获取深层岩土的物理力学参数，并结合标准贯入试验对不同深度的地基承载力进行评估，优化了高层建筑的地基设计。王远达等<sup>[6]</sup>探讨了在高压旋喷注浆技术中，利用高压水泥浆与软土结合生成硬化桩体的过程，并结合深层搅拌桩技术，显著改善了松散地层的结构强度，适用于杂填土和粉质黏土层的处理。此外，叶林米等<sup>[7]</sup>提出通过引进先进的物探和原位测试技术，如电阻率测试和钻孔电视监测，优化勘察方案，特别是在复杂的水文和地质条件下提高了勘察的精确度和地基处理的针对性。李登科等<sup>[8]</sup>详细探讨了强夯法在软弱地基中的应用，使用高达 8 000 kN 的夯击能有效加固松软土层，并通过实时监测夯实效果，确保地基加固深度和均匀性，适用于大面积软弱地基的处理。

尽管近年来针对高层建筑岩土勘察与地基处理技术的研究取得了显著进展，但现有研究多集中于单一技术的应用，缺乏在复杂地质条件下多种技术方案的系统对比分析，尤其是在承载力、沉降控制和施工成本等多维度指标上的深入探讨。为弥补这一研究空白，本研究旨在基于《岩土工

程勘察规范》及其他相关规范的指导下<sup>[9-10]</sup>，探讨高层建筑岩土勘察分析和地基处理技术的应用。本文将以贵州省凯里市某高层住宅小区项目为例，详细分析该场地的地质条件、岩土特性及潜在的地质问题，并结合相应的参考指标，对泥浆护壁钻孔灌注桩等不同地基处理技术的承载力、沉降特性、施工效率及成本进行对比分析，以期可为类似地质条件下高层建筑的地基设计与施工提供科学依据和实践指导。

## 1 工程概述

本研究聚焦于贵州省凯里市的拟建工程，该工程地处北京东路北侧，交通便利，场地整体地势东北高西南低，地貌属于中低山剥蚀残丘岩溶地貌，见图 1 所示。项目包括多栋高层住宅建筑，建筑高度为 24 ~ 26 层，采用框架剪力墙结构，设计地基基础为桩基础，最大单桩承载力设计值为 25 000 kN。场地地层由第四系素填土、红黏土及白云岩组成，其中素填土厚度为 0.30 ~ 7.50 m，红黏土层厚度为 0.50 ~ 10.40 m，岩层具有岩溶发育现象，地质条件复杂。

## 2 不同地基处理技术适用性分析

在进行高层建筑岩土勘察与地基处理技术的选择时，充分了解不同地基处理技术的特点和适用条件是至关重要的。泥浆护壁钻孔灌注桩是通过泥浆护壁在地下钻孔并灌注混凝土形成桩基，优势在于适用于复杂地质条件，承载力高且沉降控制良好。预制桩基础则是预先制作桩体并打入

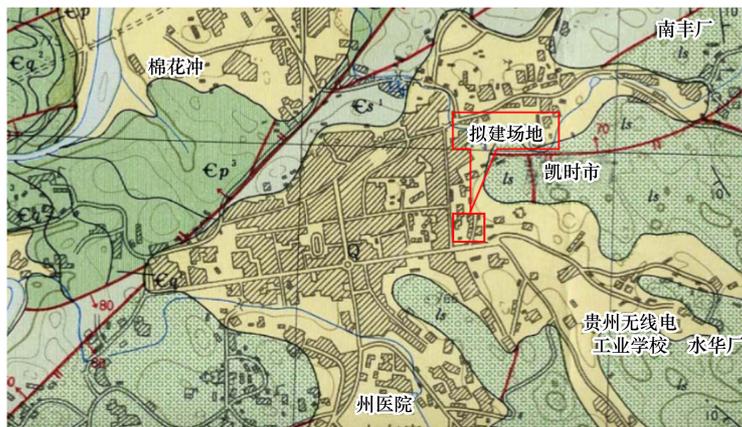


图 1 1:50 000 凯里地质图 (局部)

地基, 施工速度快、质量稳定, 适合中等硬度的地基。CFG 桩复合地基通过水泥、粉煤灰和碎石的混合桩来增强地基承载力, 成本低, 适用于软弱土层。换填法通过挖出软弱土并用高强度材料回填, 施工简单且适合浅层软土。强夯法通过重锤夯实地基, 成本较低, 适用于大面积软弱地基, 能够有效提高承载力。不同地基处理技术各有局限性: 泥浆护壁钻孔灌注桩成本高、施工复杂; 预制桩基础在硬质岩层中难以施打, 扰动地基大; CFG 桩复合地基在地下水位高或硬质基岩中效果有限; 换填法适用于浅层软土, 难处理深层软弱土; 而强夯法对周围环境振动影响大, 地下水位高的地区效果较差。

### 3 案例分析

选取位于贵州省凯里市北京东路北侧、文化北路西侧的某高层住宅小区项目。该项目地质条件复杂, 场地内存在较厚的素填土、红黏土层及风化白云岩, 且场地内局部存在地下埋藏物如防空洞等。这些复杂的地质条件对高层建筑的稳定性和地基处理提出了较高的要求。因此, 本案例的分析分为两个部分: 1) 详细探讨该项目的岩土勘察过程及分析结果; 2) 重点研究该项目中采用的地基处理技术及其应用效果, 为类似项目的岩土工程设计和施工提供参考。

#### 3.1 高层建筑岩土勘察分析

根据凯里市拟建物总平面图及建筑物柱位布

置图, 按拟建物角点坐标进行实地放样, 采用北斗 RTK 测量系统运用坐标定位法对勘探点进行测放以及高程测量。结合场地地形地貌、岩土构成等特点进行勘探孔布置。本次勘察为详勘, 采用两台锡探 300GXY\_2LS 钻机对拟建物采取“一柱一孔”的原则进行勘探点布置, 总计勘探孔 961 个, 其中取样孔 30 个, 标贯孔 90 个, 动探孔 100 个, 超声波孔 280 个。所用设备及相关参数如表 1 所示。

##### 3.1.1 原位测试

(1) 标准贯入试验 (SPT)。根据勘察所进行的标准贯入试验结果 (见图 2), 经过修正后, 其平均锤击数  $\mu$  为 5.83 次, 标准差  $\sigma$  为 1.26, 变异系数  $\delta_s$  为 0.206, 统计修正系数  $\psi$  为 0.963, 最终得出的标准锤击数为 5.61 次。按照《工程地质手册》的公式  $P_0 = 80 + 20.2 N$  进行计算, 得出  $P_0 = 193.32 \text{ kPa}$ ; 同时, 计算地基土的压缩模量  $E_s$  为 5.8 MPa (公式为  $E_s = 4.6 + 0.21 N$ )。得出锤击数修正值  $N$  为 7.27, 红黏土的黏聚力  $c$  为 35 kPa, 内摩擦角  $\varphi$  为  $7^\circ$ 。因此, 根据场地原位测试成果, 结合地区工作经验, 设定红黏土  $f_{ak} = 190 \text{ kPa}$ ,  $E_s = 5.8 \text{ MPa}$ ,  $\gamma = 18.00 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 35 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 7^\circ$ 。

(2) 重型动力触探试验。在拟建场地的 100 个勘探点上进行了重型动力触探试验, 实验结果的统计数据如图 3 所示。

表 1 高层建筑岩土勘察中使用的设备及相关测试参数

测试类型	使用设备	相关参数	备注
钻探与取样	锡探 300GXY_2LS 钻机	土层: 干钻、冲击钻进; 岩层: 清水回转钻进	用于地质构造勘察
标准贯入试验 (SPT)	标准贯入器	记录贯入 30 cm 的锤击数, 共 90 个试验孔	评估红黏土层承载力
重型动力触探试验	自动落锤装置	记录贯入 10 cm 的锤击数, 共 100 个试验孔	针对强风化白云岩层
钻孔超声波纵波速度测试	SYC - II 型超声波仪	每 0.20 m 测一点, 总测试长度 4 384.8 m	评价岩体完整性
岩石地基荷载试验	150 t 千斤顶	最大加载量不小于预估荷载 3 倍, 分级施加	确定中风化白云岩承载力
岩石饱和单轴抗压强度试验	实验室压缩测试设备	强度范围 25.8 ~ 38.1 MPa	测试中风化白云岩的抗压强度
地下水位观测	钻孔简易水文观测设备	48 h 简易水文观测	了解地下水埋深情况

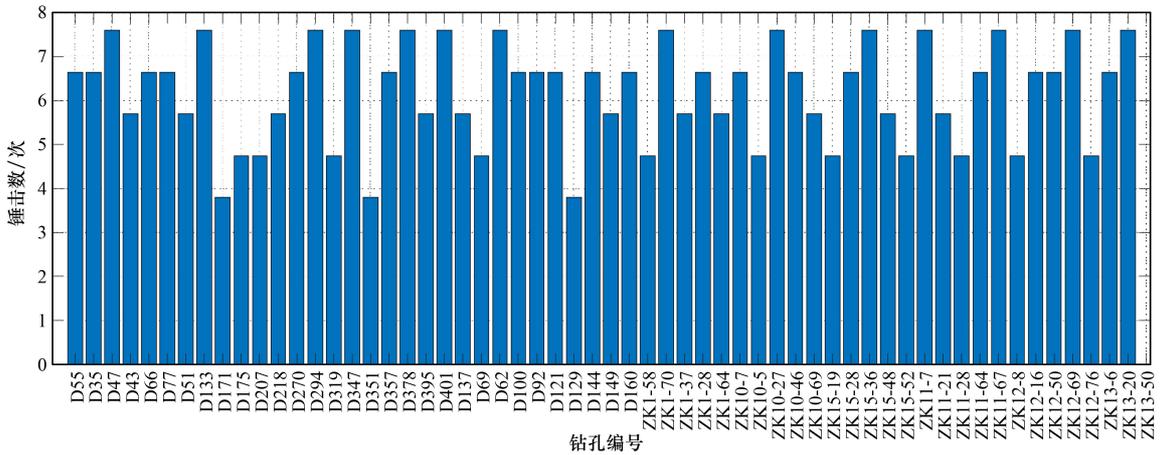


图 2 标准贯入测试成果

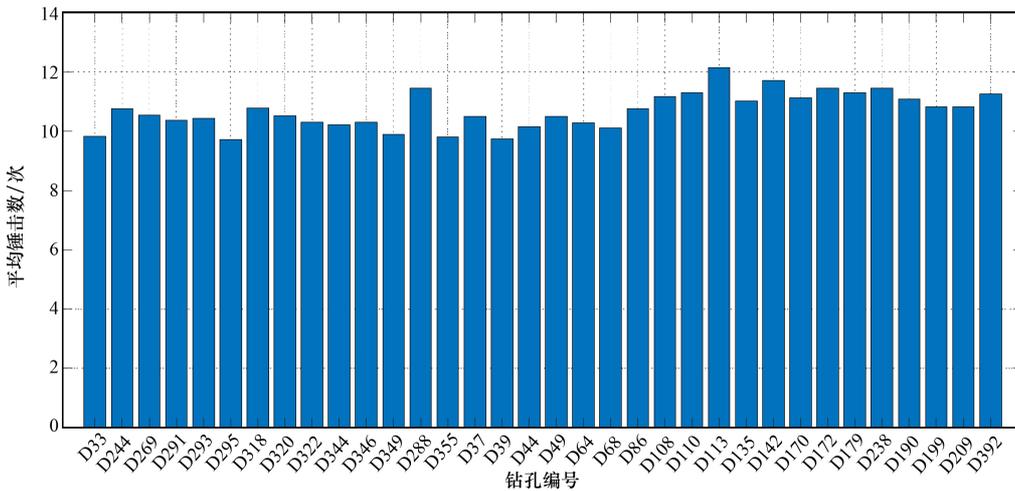


图 3 重型动力触探试验测试不完全统计结果

试验得出的锤击数在 9 至 13 次之间，平均锤击数为  $\mu = 11.88$ 。经过杆长修正后，修正后的锤击数为  $n = 10.52$ 。根据《工程地质手册》相关标准，结合附近类似工程的经验，设定该场地的地基承载力特征值  $f_{ak}$  取值为 500 kPa，变形模量  $E_0$  为 35 MPa，土体重度  $\gamma$  为 23.00 kN/m<sup>3</sup>。

(3) 钻孔超声波纵波速度测试。在强风化白云岩中，节理裂隙发育，导致岩体呈现破碎状态，岩芯多呈砂状或粉状。在进行钻孔时，超声波纵波速度的测试结果范围为 2 000 ~ 2 999 m/s，平均值为 2 365.06 m/s。相比之下，中风化白云岩的节理裂隙相对较少，但岩体依然较为破碎，岩芯

通常呈碎块状或碎石状，有时会看到短柱状的岩芯。在此条件下，钻孔超声波纵波速度测试结果范围为 3 000 ~ 3 999 m/s，平均值为 3 389.36 m/s。

为进一步研究中风化白云岩的物理力学特性，取了 30 件岩芯样品进行饱和单轴抗压强度试验，并对其中的 24 件样品进行了室内声波速度测试。试验结果显示了岩芯样品的抗压强度及其对应的波速值，具体数据汇总如表 2 所示。

岩体的完整性系数是通过岩体纵波波速与岩块纵波波速之比的平方计算得到的。各个岩体单元的完整性系数如下表所示。根据《贵州省建筑岩土工程技术规范》，计算岩体完整性系数时，岩

表 2 中风化白云岩室内试验指标统计结果

指标	取值范围	统计数	平均值	标准差	变异系数	统计修正系数	标准值
饱和单轴抗压强度/MPa	25.8 ~ 38.1	30	30.60	3.44	0.112	0.965	29.51
室内岩块压缩波速/(m·s <sup>-1</sup> )	4 934 ~ 5 566	24	5 150.17	—	—	—	—

体波速的代表值应取测试岩体单元的统计平均值,而岩块波速的代表值则应取大于岩体波速最大值的岩块波速统计平均值,即 5 150.17 m/s,作为该场地完整岩块的平均纵波速度。基于此,通过实测钻孔数据计算出分段完整性系数  $K_v$ , 具体如表 3 所示。

从生成的波速柱状图图 4 可以看出,随着深度的增加,波速呈现出明显的变化趋势。图中的波速数据大致分为两个部分:深度在 1~9 m 之间的波速较低,波速值在 2 200~2 600 m/s 之间,这一范围对应的是强风化白云岩层,其波速较低且较为分散,反映出岩体较为破碎,节理裂隙发育,整体岩体质量较差。

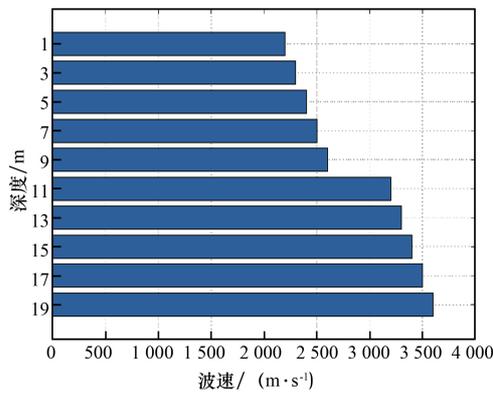


图 4 不同深度的波速柱状图

随着深度进一步增加至 11 m 及以下,波速明显提高,波速值在 3 200~3 600 m/s 之间,进入了中风化白云岩层。这一层的波速较为集中且较高,表明岩体的完整性有所改善,节理裂隙较少,岩体质量较好,具备更高的承载力。整体来看,波速的增加表明岩体从强风化向中风化过渡,地基的承载能力随着深度增加而显著提高。

结合表 2、3 以及图 4 可知,中风化白云岩的饱和单轴抗压强度标准值为 29.51 MPa,强风化岩体完整性系数为 0.21,中风化岩体完整性系数为 0.43。按《岩土工程勘察规范》判断,其强风化白云岩岩石坚硬程度为软岩,完整性程度为破碎,

岩体基本质量等级为 V 类;中风化白云岩岩石坚硬程度为较硬岩,完整性程度为较破碎,岩体基本质量等级为 IV 类。

### 3.1.2 取样试验

(1) 岩石饱和单轴抗压强度试验。根据本次勘察钻探时所取 30 件中风化白云岩岩芯所做的岩石饱和抗压强度试验报告,统计结果如表 3 所示。结合本次勘察所作钻孔纵波速度测试成果,经计算其完整性指数为 0.43,再结合《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)第 5.2.6 条,其折减系数经内插计算取 0.14,  $f_{ak} = \psi \cdot f_{rk} = 4.131$  MPa,其承载力特征值为  $f_{ak} = 4 143.00$  kPa。结合岩石地基荷载试验,设置中风化白云岩承载力  $f_{ak} = 4 000$  kPa,  $\gamma = 26.50$  kN/m<sup>3</sup>。

根据《岩土工程勘察规范》的相关规定,结合拟建项目的设计方案和场地岩土条件,该项目的工程重要性等级、场地复杂程度等级和地基复杂程度等级均被评定为二级。综合考虑这些因素,本次岩土工程勘察的最终等级确定为乙级。

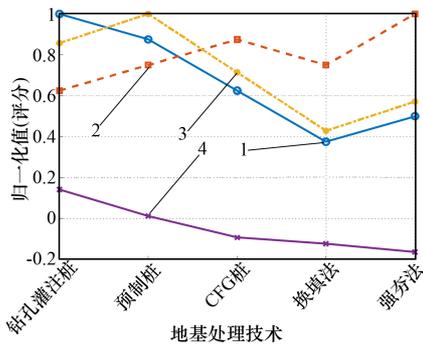
### 3.2 地基处理技术应用

该项目中,由于场地内复杂的地质条件,桩基础处理技术的选择与应用成为了确保建筑物稳定性的重要措施。该项目场地主要由素填土、红黏土层、强风化白云岩及中风化白云岩构成,其中上覆土层的厚度变化较大,地质条件不均匀且存在防空洞等不良地质作用,使得传统的天然地基无法满足高层建筑的承载要求。基于勘察数据,图 5 显示了不同地基处理技术的承载力特征值、最大沉降量和施工成本的归一化对比,以及各技术的综合评分。

由于场地内存在厚度不均的素填土和红黏土层,这些土层无法提供足够的承载力,且强风化白云岩层节理裂隙发育,岩体较为破碎,因此直接利用天然地基是不适宜的。图中的承载力特征值一项,泥浆护壁钻孔灌注桩以最高的归一化得

表 3 中风化白云岩岩体完整性系数计算结果

地层岩性	单元编号	岩体纵波速度平均值/(m·s <sup>-1</sup> )	完整岩块纵波速度取大于岩体波速值最大值的岩块波速统计平均值/(m·s <sup>-1</sup> )	波速比	完整性系数
强风化白云岩	③	2 365.06	5 150.17	0.46	0.21
中风化白云岩	④	3 389.36		0.66	0.43



1—承载力特征值；2—最大沉降量；  
3—施工成本；4—综合评分。

图 5 地基处理技术比选

分(1.0)凸显出其优越的承载能力，远高于其他技术。此外，泥浆护壁钻孔灌注桩在最大沉降量方面也表现出较小的沉降值，这对于保证建筑物的长期稳定性至关重要。尽管施工成本较高，但综合考虑承载力和沉降控制的重要性，泥浆护壁钻孔灌注桩在综合评分中表现最佳，支持了项目选择这一技术的决策。桩基础设计参数如表 4 所示，参数主要包括极限侧阻力、极限端阻力和桩身的重度等。表格中的参数表明，中风化白云岩层是设计中主要的承载层，桩端深入此层后可以获得极高的端阻力。此外，强风化白云岩的侧阻力虽然较低，但通过合理控制桩长，确保桩基的整体稳定性和承载力。

虽然理论分析和技术比选为这一选择提供了坚实的基础，但为了确保设计预期与实际施工效果的一致性，并验证桩基在实际荷载条件下的表现，必须进行桩基静载荷试验。该试验能够直接测量桩基的承载力和沉降特性，为施工质量控制和最终工程验收提供可靠的实测数据。

在桩基静载荷试验图(图 6)中，载荷(kN)与

沉降量(mm)之间的关系反映了桩基在不同施加荷载下的沉降特性。随着荷载的增加，沉降量逐渐增大，表现出典型的非线性关系。图中的初始阶段，荷载较小，沉降量增幅较低，说明桩基的刚性较强，土体及桩体均能较好地承载荷载。然而，当荷载超过一定值后，沉降量的增加速度显著加快，曲线逐渐趋于陡峭，表明桩基接近其承载力极限。这种现象通常反映了桩体周围土体的塑性变形逐渐显现，桩端承载力和侧摩阻力逐步达到极限。最终，荷载达到 5 000 kN 时，沉降量达到 25 mm，显示出桩基在该荷载下已达到设计极限。

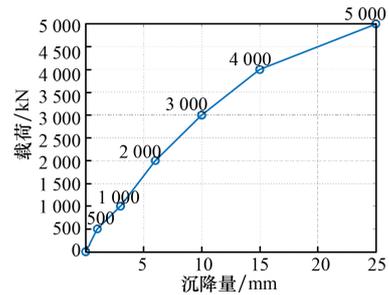


图 6 桩基静载荷试验

### 4 结 论

(1) 在项目场地的岩土勘察过程中，详细的勘探和多种测试手段的结合，揭示了场地内存在的素填土、红黏土层及风化白云岩等复杂地质问题。这些岩土信息为地基设计提供了科学依据，并确立了中风化白云岩作为桩基持力层的可行性。

(2) 基于承载力、沉降量和施工成本等关键参数的对比分析，泥浆护壁钻孔灌注桩被选为该项目的地基处理技术。该技术在提升地基承载能力和控制沉降方面表现优异，适合于复杂地质条件下的高层建筑项目。

表 4 岩土参数建议取值

岩土层	负摩阻力	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	地基承载力特征值/kPa	极限侧阻力/kPa	极限端阻力/kPa
素填土	0.3	—	—	—	18.5	—	—	—
红黏土	—	5.8	35	7	18.0	190	—	—
强风化白云岩	—	—	40	26	23.0	500	150	—
中风化白云岩(岩土)	—	—	115	38	26.5	4 000	2 000	14 000
中风化白云岩(层理面)	—	—	90	27	26.5	4 000	2 000	14 000
中风化白云岩(节理面)	—	—	85	25	26.5	4 000	2 000	14 000

(3) 通过桩基静载荷试验验证了桩基设计的合理性, 2 000 kN 荷载下沉降量为 6 mm, 5 000 kN 荷载下沉降量为 25 mm, 验证了泥浆护壁钻孔灌注桩的设计合理性和施工效果。试验结果表明, 桩基在最大荷载下的沉降量符合设计要求, 承载力表现出色, 确保了建筑物的安全性和长期稳定性。

本研究为复杂地质条件下高层建筑的岩土勘察与地基处理技术应用提供了科学依据和实践指导。合理的勘察分析和技术选择能够显著提高地基承载力, 减少不均匀沉降, 从而保障建筑物的安全与稳定。

### 参考文献:

- [1] 陈俊任. 高层建筑岩土工程勘察分析及地基处理技术应用研究[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(5): 2.
- [2] 邓衍成. 建筑工程的岩土勘察及地基处理技术分析[J]. 住宅与房地产, 2020, 565(6): 188 - 193.

- [3] 孙富强. 某高层建筑岩土勘察分析及地基处理技术应用探讨[J]. 中华民居(下旬刊), 2013(3): 231 - 232.
- [4] 黄龙. 高层建筑岩土工程勘察分析及地基处理技术应用[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(24): 133 - 134.
- [5] 陈启贵. 高层建筑岩土勘察分析及地基处理技术应用研究[J]. 工程与建设, 2023, 37(6): 1688 - 1690.
- [6] 王远达, 王益梁, 许德程. 关于建筑工程的岩土勘察及地基处理技术分析[J]. 石化技术, 2023, 30(12): 294 - 296.
- [7] 叶林米, 陈芊竹. 岩土工程勘察与地基处理技术研究[J]. 工程建设与设计, 2022(24): 177 - 179.
- [8] 李登科, 韩锐. 岩土工程勘察与地基施工处理技术分析[J]. 石材, 2023(2): 19 - 21.
- [9] 袁增会, 赵玉瓚. 高层建筑岩土工程勘察分析及地基处理技术[J]. 四川建材, 2023, 49(10): 43 - 45.
- [10] 李泽彬. 沿海区域某高层建筑岩土工程勘察分析与评价[J]. 工程技术研究, 2024, 9(10): 38 - 40.

(上接第 39 页)

(2) 基坑开挖结束后, 弯矩最大峰值出现在埋深 7.5 m 处, 剪力峰值出现在埋深 8.3 m 处, 同时, 第一道横撑上部钢板桩几乎不再受弯, 上部弯矩传递至第一道横撑中, 结构内力在第二道横向支撑附近达到峰值。

(3) 桩后土压力整体分布趋势为随埋深增大而逐渐增大, 但二次横撑改变了桩后土压力的分布形式, 土压力在埋深 5.5 m 处由峰值 138.6 kPa 陡降至 92.6 kPa, 降低幅度达 33.2%, 之后土压力呈现波动变化, 直至开挖结束。

### 参考文献:

- [1] 李广, 杨泽平, 张敏思等. 复杂环境下深大基坑逆作法拉森钢板桩支护设计[J]. 建筑结构, 2021, 51(22): 141 - 146.
- [2] 胡海兵. 拉森钢板桩在深基坑支护中的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(11): 32 - 34.
- [3] 李贵. 钢板桩施工技术在桥梁主墩承台深基坑支护

- 中的应用[J]. 科学技术创新, 2023(22): 162 - 165.
- [4] 刘迪, 余龙, 陈勇. 双排钢板桩围堰设计计算方法探讨[J]. 公路, 2023, 68(6): 272 - 282.
- [5] 陈磊, 谢靖宇, 洪钊等. 双排钢板桩围堰支护结构参数优化及稳定性验算[J]. 铁道勘察, 2023, 49(3): 144 - 148.
- [6] 孔德国. 基于 Midas GTS/NX 的双排拉森钢板桩数值模拟及其工程应用[J]. 工程建设, 2019, 51(7): 39 - 42.
- [7] 马光星. 钢板桩支护在市政工程深基坑施工中的应用[J]. 工程机械与维修, 2023(2): 240 - 242.
- [8] 朱荣浩, 章晨昊, 刘松涛等. 拉森钢板桩围堰施工有限元数值模拟及优化研究[J]. 科学技术创新, 2021(28): 98 - 101.
- [9] 陈丕辉. 拉森钢板桩的支护特性及其横撑水平间距研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(11): 123 - 126.
- [10] 李连祥, 王兴政. 考虑基坑支护结构变形模式的土压力研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 1024 - 1033.