

溶洞发育区桩基持力层稳定性评价与处理方案优化

于丹平¹ 段振亮¹ 蓝 恒¹ 冉松滔² 陆 萌³

- 1. 深圳市大鹏新区建筑工程署 广东 深圳 518120
- 2. 晨越建设项目管理集团股份有限公司 广东 深圳 518119
- 3. 中国建筑第五工程局有限公司 广东 深圳 518119

摘 要：本文以白石岗城市更新配套学校项目为背景，针对溶洞发育区的桩基持力层稳定性问题进行了深入评价，并提出了高压洗孔注浆填充技术的优化处理方案。通过详细分析项目地质条件、溶洞发育特征、桩基检测结果及现场监测数据，结合严格的质量控制措施，有效提高了桩基持力层的稳定性，为类似工程提供了可借鉴的经验和技术支持。

关键词：溶洞发育区；桩基持力层；稳定性评价；处理方案优化；高压洗孔注浆

1 引言

溶洞发育区由于地质条件复杂，岩溶作用强烈，导致地基土层分布不均，溶洞、溶沟、溶槽等不良地质现象频发。这些地质特征对桩基施工及持力层稳定性构成严重威胁，增加了工程建设的难度和风险。在城市化进程不断加快的背景下，如何在溶洞发育区安全高效地进行桩基施工，确保上部结构的安全稳定，成为工程界亟待解决的问题。本文以白石岗城市更新配套学校项目为例，针对溶洞发育区的桩基持力层稳定性问题进行评价，并提出优化处理方案，以期为类似工程提供参考^[1]。

2 工程概况

2.1 项目基本情况

白石岗城市更新配套学校项目位于深圳市大鹏新区葵涌办事处白石岗片区，旨在建设一所36班九年一贯制学校，提供小学学位1080个，初中学位600个。项目总用地面积16300平方米，总建筑面积为37019平方米，包括教学楼、教师宿舍楼、地下车库及设备用房、生活服务用房等配套设施。工程建筑耐火等级二级，抗震烈度7度，设计使用年限50年，绿色建筑等级为国标二星级。该项目作为城市更新配套工程，对于提升区域教育水平、改善居民生活条件具有重要意义^[2]。

2.2 地质条件

项目场地内分布的地层主要包括第四系人工填土层（Qml）、第四系上更新统冲洪积层（Q3al+pl）、第四系不明成因堆积层（Qpr）及石炭系下统石磴子组灰岩（C1s）。基岩起伏较大，部分岩体破碎，溶洞发育强烈。局部分布有溶洞，钻探揭露溶洞最大高度达18.40m，显示出该区域岩溶作用的强烈程度。根据超前钻报告，当前勘察显示线溶洞率为22.2%，遇洞隙率为67%，溶洞发育无规律，大小不一，对桩基施工及持力层稳定性构成严重影响。此外，场地内还存在地下水丰富、水位变化大等问题，进一步增加了施工难度^[3]。

3 桩基持力层稳定性评价

3.1 溶洞发育特征

溶洞发育特征是影响桩基持力层稳定性的关键因素之一。根据超前钻报告及桩基检测结果，项目场地内溶洞厚度在≤3m占比63.86%，<10m占比30.12%，≥10m占比6.02%。溶洞发育无规律，部分溶洞连通性强，形成串珠状溶洞，进一步增加了桩基施工的难度和风险。溶洞的存在导致桩底承载力不均匀，易引发桩基沉降及倾斜，严重影响上部结构安全^[4]。

3.2 桩基检测结果分析

桩基检测过程中发现，部分桩底持力层存在溶洞层，导致桩底承载力不足，影响桩基整体稳定性。具体检测结果如表1所示（部分示例数据）：

表1 桩基检测持力层溶洞情况统计表

序号	桩号	桩径	单桩承载力	原超前钻桩持力层情况	实际检测溶洞情况
1	A105	1200mm（桩长：19.95m）	单桩竖向承载力9800KN	桩底以下为完整微风化基岩	桩底标高：4.8m 第1孔：2.52~2.32m为溶洞（厚度0.2m）
					桩底标高：4.8m 第2孔：4.55~2.88m为溶洞（厚度1.67m） 2.44~0.69m为溶洞（厚度1.75m）

续表：

序号	桩号	桩径	单桩承载力	原超前钻桩持力层情况	实际检测溶洞情况
2	A54	1200mm (桩长：14.95m)	单桩竖向承载力9800KN	桩底以下为完整微风化基岩	桩底标高：5.4m 第1孔：4.05~0.23m为溶洞（厚度3.82m）
					桩底标高：5.4m 第2孔：3.49~0.4m为溶洞（厚度3.89m）
3	A55	1000mm (桩长：7.22m)	单桩竖向承载力6800KN	桩底以下为完整微风化基岩	桩底标高：13.28m 11.05~10m为溶洞（厚度1.05m） 9~6.89m为溶洞（厚度2.11m）
4	A38	1000mm (桩长：17.96m)	单桩竖向承载力6800KN	桩底以下为完整微风化基岩	桩底标高：2.34m -0.61~-1.21m为溶洞（厚度0.6m） -3~-3.5m为溶洞（厚度0.5m）
5	A217	800mm (桩长：19.09m)	单桩竖向承载力4300KN	桩底以下为完整微风化基岩	桩底标高：11.06m 8.36~4.37m为溶洞（厚度3.99m）
...	...	...	...	...	...

从表中可以看出，部分桩基持力层存在较大溶洞，严重影响了桩基的承载力和稳定性。特别是在溶洞连通性强、溶洞高度较大的区域，桩基失稳的风险更高。

3.3 稳定性评价

基于地质勘察及桩基检测结果，对桩基持力层稳定性进行评价。溶洞发育导致桩底承载力不均匀，易引发桩基沉降及倾斜，严重影响上部结构安全。特别是在溶洞连通性强、溶洞高度较大的区域，桩基失稳的风险更高。此外，地下水的作用也可能加剧桩基的不稳定，如地下水渗流可能导致桩周土体软化、流失，进一步降低桩基的承载力。因此，需对溶洞进行有效处理，提高桩基持力层的稳定性。

4 处理方案优化

4.1 高压洗孔注浆填充技术

针对溶洞发育区的桩基持力层问题，采用高压洗孔注浆填充技术进行处理。该技术通过高压水流及注浆材料填充溶洞空腔，提高地基土的密实度及强度，从而增强桩基持力层的稳定性。具体技术要点如下：

4.1.1 施工设备及材料：（1）施工设备：主要包括MGJ-50双重管旋喷机、RH-1.05/12.5空压机、高压注浆泵、YZB-70/50型双液注浆泵及搅拌机等。这些设备具有高压、高效、稳定等特点，能够满足溶洞处理的需求。（2）施工材料：采用高强无收缩灌浆料（水下抗分散型）、水玻璃（外加剂）及自来水。高强无收缩灌浆料具有流动性好、早期强度高、无收缩等特点，适用于溶洞填充加固。水玻璃作为外加剂，能够加速灌浆料的凝固，提高注浆效率。

4.1.2 主要技术参数：（1）钻孔深度：距桩底下不小于5m（或达到钻孔基岩累计厚度5m），确保处理深

度足够，能够有效填充溶洞并提高桩底承载力。（2）处理深度：超过溶洞深度不小于1.0米，对桩身夹泥及桩底成渣的清洗、加固问题部位上下不小于1.5米，确保溶洞得到充分处理。（3）洗孔水压：约20MPa，确保清洗效果，能够有效清除孔壁及溶洞内的渣土和泥浆。（4）注浆材料配合比：高强无收缩灌浆料2.3t/立方，水玻璃76kg/立方，自来水800kg/立方，确保注浆材料性能满足设计要求，提高溶洞填充的密实度和强度。

4.2 施工流程优化

4.2.1 清孔洗孔：采用双管旋喷机将钻杆下放至缺陷部位，利用水流压加风压进行清洗。旋喷机钻杆上下反复来回移动，将缺陷部位的渣土及泥浆还出孔口，直至孔口还清水为止。清洗过程中注意控制水压和风压，避免对孔壁造成破坏。同时，根据孔内情况及时调整清洗时间和方式，确保清洗效果。

4.2.2 注浆作业：（1）单液注浆：采用BW-150型注浆泵进行注浆，注浆嘴必须贯至孔底，浆液射流压力值拟定为20MPa。注浆时注浆管逐步提升，提升速度严格控制为6-18cm/min，确保注浆均匀，避免出现注浆空白区。（2）双液注浆：当单液注浆超过30分钟压力值仍不稳定时，立即采用双液注浆。通过注浆管传送快速在桩底持力层范围内形成一个初凝体的“止浆层”，再进行补注浆，确保溶洞填充密实。双液注浆能够加速浆液的凝固，提高注浆效率，特别适用于溶洞连通性强、注浆难度大的情况。

4.2.3 补浆与封孔：注浆达到要求后，连接的注浆管进行补浆，排走浆液内的空气和水灰比较大的浆液，确保溶洞填充密实无空洞。注浆完成后，稳压5-10min，若压力不下降或压力值下降不超过5%，则可正常止浆，结

束注浆。最后进行封孔处理,采用水泥砂浆或混凝土等材料将孔口密封良好,防止地下水渗入影响注浆效果。

5 现场监测与质量控制

5.1 现场监测

在施工过程中,对桩基及周围环境进行全方位监测,包括地面沉降、孔内水位变化、桩身位移等。监测数据实时反馈至施工方及监理方,以便及时调整施工参数,确保施工安全。具体监测措施如下:(1)地面沉降监测:在桩基周围布设沉降观测点,定期测量地面沉降量,分析沉降趋势。通过沉降观测数据的分析,可以及时发现桩基施工对周围环境的影响,采取相应措施进行防范和处理。(2)孔内水位监测:在桩孔内设置水位观测管,实时监测孔内水位变化,判断是否存在漏水情况。孔内水位的变化能够反映桩孔的稳定性和注浆效果,为施工参数的调整提供依据。(3)桩身位移监测:采用测斜仪等设备监测桩身位移情况,确保桩身稳定。桩身位移的监测能够及时发现桩基的异常情况,避免桩基失稳导致安全事故的发生。

5.2 质量控制

一是材料检验:每批注浆材料使用前均须按质检要求取样检验,确保材料质量符合设计要求。对不合格材料严禁使用,确保施工质量。材料检验是质量控制的重要环节,能够避免因材料质量问题导致的施工质量隐患。二是注浆过程记录:详细记录注浆孔位、孔深、注浆量及注浆压力等参数,确保注浆过程可控。对异常情况及时分析原因并采取措施进行处理,如调整注浆参数、更换注浆材料等。注浆过程记录能够为施工质量的追溯和评估提供依据。三是质量检验:对注浆孔现场留置3、7、28天抗压试块各一组进行抗压强度试验,28天标养试块抗压强度不低于50MPa。对不合格试块进行补注浆处理,确保溶洞填充质量。质量检验是确保施工质量的重要手段,能够及时发现并处理施工质量问题,保证桩基的稳定性和安全性。

6 环境保护与安全措施

6.1 环境保护

一是泥浆处理:施工过程中产生的泥浆采用泥浆分离器进行处理,将泥浆中的固体颗粒分离出来,减少泥浆对环境的污染。处理后的泥浆可以循环利用,降低施工成本。二是噪音控制:选用低噪音的施工设备,合理安排施工时间,避免在居民休息时间进行高噪音作业。同时,在施工现场周围设置隔音屏障,减少噪音对周围环境的影响。三是粉尘控制:对施工现场进行定期洒水降尘,减少粉尘的产生和扩散。对易产生粉尘的材料进

行覆盖或封闭存放,避免粉尘对空气质量的污染。

6.2 安全措施

一是安全教育培训:对施工人员进行安全教育培训,提高施工人员的安全意识和操作技能。培训内容包括安全法规、安全操作规程、应急救援等方面,确保施工人员能够熟练掌握安全知识和技能。二是安全防护设施:在施工现场周围设置安全防护栏杆、安全警示标志等设施,防止非施工人员进入施工区域。对高处作业、电气作业等危险作业设置专门的安全防护设施,如安全带、绝缘手套等,确保施工人员的安全。三是应急救援预案:制定应急救援预案,明确应急救援组织机构、应急救援程序、应急救援物资等。定期组织应急救援演练,提高施工人员的应急救援能力和协同作战能力。在发生安全事故时,能够迅速、有效地进行救援和处理,减少事故损失。

7 结论与展望

7.1 结论

本文针对溶洞发育区的桩基持力层稳定性问题进行了深入评价,并提出了高压洗孔注浆填充技术的优化处理方案。通过分析项目地质条件、溶洞发育特征、桩基检测结果及现场监测数据,结合严格的质量控制措施,有效提高了桩基持力层的稳定性。该方案在白石岗城市更新配套学校项目中的应用取得了良好效果,为类似工程提供了可借鉴的经验和技术支持。

7.2 展望

未来,随着城市化进程的不断加快和地质条件的日益复杂,溶洞发育区的桩基施工将面临更多挑战。因此,需要进一步研究和完善溶洞处理技术,提高施工效率 and 安全性。同时,加强地质勘察和桩基检测工作,提前发现并处理潜在的地质问题,确保工程质量和安全。此外,还可以探索采用新技术、新材料、新工艺等手段,提高溶洞处理的效率和质量,推动桩基施工技术的不断创新和发展。

参考文献

- [1]李新.岩基载荷试验在确定桩基持力层承载力中的应用[J].工程建设与设计,2024,(18):182-184.
- [2]卿浩.声呐技术在岩溶地区桩基持力层工程中的应用[J].工程机械与维修,2025,(06):137-139.
- [3]李新.岩基载荷试验在确定桩基持力层承载力中的应用[J].工程建设与设计,2024,(18):182-184.
- [4]石中明.某结构桩基础持力层优化设计[J].工程建设,2024,56(07):51-55.