

湖南株洲岩溶发育地质旋挖桩工艺下岩溶处理方式的对比研究

文 / 李 伟 湖南省勘测设计院有限公司

程火焰 湖南科技大学

肖 蓉 湖南高速设计咨询研究院有限公司

摘要: 在湖南株洲市某湘江边项目的勘察中, 探测到岩溶不良地质, 使后续桩基工程面临很大风险, 现场逐孔超前钻探明: 场地基岩为灰岩, 裂隙较发育、溶蚀较强烈, 主要表现为单岩溶及竖向连续岩溶。现场通过四种不同的岩溶处理方式现场施工情况对比分析, 结果表明: 采用水泥浆注浆的方式处理, 不仅降低了成本, 且工期最短, 还起到了固结整个场地的作用, 适用于本项目。可为其他类似场地地基处理提供参考。

关键词: 岩溶地区; 地基处理; 注浆(水泥浆)处理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.018

引言

岩溶地区指地质构造中富含溶蚀作用的区域, 这些区域地质构造复杂, 地表、地下水丰富, 岩溶的存在, 对基础施工有很大的影响, 通过注浆方式来进行岩溶处理^[1], 能很好地提高地基的稳定性, 保障上部结构的安全。

一、工程简介

某工程地处株洲湘江南岸, 距湘江约 2km。原始地形标高约 52 ~ 90m, 位于丘陵与丘间凹地组成的复合地貌单元, 丘坡坡度约 5.0° ~ 25.0°, 场地内洼地分布有人工改造的水塘, 场地内分布茶子树、杂树、松树等植被, 洼地长有荒草。

工程灌注桩桩基采用直径 $\Phi 800\text{mm}$ 旋挖成孔灌注桩, 桩长约 15m ~ 25m, 桩端持力层为⑤层灰岩。设计场平高程在 69.0 ~ 74.0m, 因该工程场地有覆盖性岩溶发育, 发育程度为中等~极其强烈, 桩基施工前进行岩溶施工勘察, 按照一柱一孔的原则进行超前钻, 探明该柱桩端以下 5m 范围内的岩溶地基分布情况, 以确保桩的质量和工程安全。

(一) 场地地基岩土构成与特征

根据勘测资料, 各土层从上而下依次为: ①素填土, ②1 粉质黏土(可塑), ②2 粉质黏土(软塑), ③1 粉质黏土(硬塑), ③2 粉质黏土(可塑), ④1 粉质黏土(硬塑), ④2 粉质黏土(可塑), ④3 粉质黏土(软塑), ⑤灰岩, ⑤1 岩溶(土), ⑤2 灰岩, ⑥碳质灰岩。勘察报告显示, 地下水类型主要为孔隙性水(潜水、上层滞水)及岩溶水。

(二) 岩溶不良地质发育情况

工程区域无崩塌、滑坡、泥石流及土洞等不良地质作用, 下覆基岩主要为灰岩, 局部区域分布碳质灰岩, 存在岩溶、溶沟、溶槽等岩溶发育现象。

二、超前钻施工情况统计

G1、G2、G3 区域桩基施工图纸总计 850 根桩, 超前钻 100%, G1 区域岩溶占比 69.23%, 单层最大岩溶深度 8.7m, G2 区域岩溶占比 86.53%, 单层最大岩溶深度

14m, G3 区域岩溶占比 84.70%, 单层最大岩溶深度 4m, 综合超前钻资料统计分析, 该工程施工区域地质复杂, 岩面起伏变化大, 且局部土岩接触面存在层压水, 钻孔遇洞率极高, 串珠状岩溶发育较多, 大型岩溶相对较多, 且多层岩溶占比较高。

三、岩溶处理方式的比选

场地岩溶情况复杂, 为了选择合适的处理方式, 经建设、设计、监理、施工、勘察单位商议, 决定选取超前钻孔内岩溶发育接近的桩, 选取 4 种不同处理方式, 每种方式选取 5 根桩进行处理, 从处理效果、施工可行、成本、工期四个方面择优确定适合整个场地的处理方式。

四、岩溶处理方式及相关桩位施工情况统计

本次根据 G1 区域已钻完的 299 根超前钻数据, 每种处理处理方式选取 5 个孔, 同比岩溶竖向分布及米数接近, 岩溶深度以场平标高 60m \pm 0。

(一) 岩溶注浆(1:1 水泥浆)(预处理)

G1-274 桩岩溶为单孔, 溶洞总米数 1.0 米, 注浆量 51.2m³;

G1-281 桩岩溶为不同深度位置的 3 个, 溶洞总米数 1.2 米, 注浆量 60.5m³;

G1-287 桩岩溶为不同深度位置的 4 个, 溶洞总米数 4.5 米, 注浆量 65.4m³;

G1-37 桩岩溶为不同深度位置的 5 个, 溶洞总米数 6.0 米, 注浆量 41.2m³;

G1-43 桩岩溶为不同深度位置的 6 个, 溶洞总米数 7.3 米, 注浆量 56.1m³;

(二) 岩溶注浆(1:1 水泥砂浆)

G1-95 桩岩溶为单孔, 溶洞总米数 1.3 米, 注浆量 3m³;

G1-52 桩岩溶为不同深度位置的 2 个, 溶洞总米数 1.6 米, 注浆量 2.0m³;

G1-19 桩岩溶为不同深度位置的 4 个, 溶洞总米数 4.7 米, 注浆量 6.0m³;

G1-25 桩岩溶为不同深度位置的4个,溶洞总米数7.2米,注浆量 8.0m³;

G1-23 桩岩溶为不同深度位置的6个,溶洞总米数6.5米,注浆量 7.2m³;

(三) 岩溶注浆 (C15 细石混凝土)

G1-53 桩岩溶为单孔,溶洞总米数0.9米,注砵量 6m³;

G1-235 桩岩溶为不同深度位置的2个,溶洞总米数1.9米,注砵量 7.5m³;

G1-26 桩岩溶为不同深度位置的5个,溶洞总米数4.5米,注砵量 10.2m³;

G1-45 桩岩溶为不同深度位置的6个,溶洞总米数7.3米,注砵量 15.2m³;

G1-34 桩岩溶为不同深度位置的6个,溶洞总米数8.0米,注砵量 22.0m³;

(四) 永久性钢护筒

选取 G1-220、G1-234、G1-275、G1-286、G1-290 五根桩,施工过程中使用打拔机安放永久钢护筒的方式进行岩溶处理施工,其中 G1-220# 桩在钢护筒下沉至地面以下 3.0m 处钢护筒无法继续下沉,紧接着现场对 G1-234# 桩、G1-275#、G1-286#、G1-290#、采用打拔机安装钢护筒,打拔机也只能将钢护筒下沉到地面以下 3.0m 左右。

(五) 岩溶处理桩位施工情况统计

通过岩溶注浆(1:1水泥浆)、岩溶注浆(1:3水泥砂浆)、岩溶注浆(C15细石混凝土)、安放永久钢护筒等岩溶处理方式处理的灌注桩施工情况统计如下表1:

处理方式	序号	桩号	孔深(m)	成孔时间(小时)	桩长(m)	理论砵用量(m ³)	实际砵用量(m ³)	充盈系数
岩溶注浆 (1:1水泥浆)	1	G1-274	20.29	9.0	17.0	8.54	9.65	1.13
	2	G1-281	23.15	8.0	20.2	10.15	11.47	1.11
	3	G1-287	27.80	10.5	24.4	12.31	15.39	1.15
	4	G1-37	28.48	13.0	25.0	12.56	15.95	1.17
	5	G1-43	28.30	12.5	25.0	12.56	16.95	1.14
岩溶注浆 (1:3水泥砂浆)	1	G1-95	19.88	10.5	16.0	8.04	10.29	1.28
	2	G1-52	18.59	9.5	15.5	7.79	11.29	1.45
	3	G1-19	24.19	11.0	22.1	11.10	14.10	1.27
	4	G1-23	20.19	10.5	17.0	8.54	11.10	1.30
	5	G1-25	25.22	11.1	22.5	11.30	14.92	1.32
岩溶注浆 (C15细石混凝土)	1	G1-53	21.65	70.0	18.5	10.87	16.41	1.51
	2	G1-235	22.10	89.0	19.6	9.84	14.96	1.52
	3	G1-26	25.60	95.0	22.2	11.15	17.28	1.55
	4	G1-45	18.60	63.0	15.6	7.84	12.39	1.58
	5	G1-34	28.00	102.0	25.0	12.56	20.10	1.60

由上表可知:1、岩溶注浆(水泥浆)的方式对岩溶预处理的5根灌注桩平均成孔时间为10.6小时,混凝土平均充盈系数为1.14。2、岩溶注浆(水泥砂浆)对岩溶预处理的5根灌注桩平均成孔时间为10.52小时,混凝土平均充盈系数为1.32。3、岩溶注浆(C15细石混凝土)对岩溶预处理的5根灌注桩平均成孔时间为83.8小时,混凝土平均充盈系数为1.55。4、该工程不适用于采用打拔机安装永久性钢护筒。

综合上述相关灌注桩成孔及浇筑情况来看,采用预注浆处理的方式对岩溶进行处理,可对串珠状岩溶、单一岩溶及岩溶裂隙起到一定的固结及封堵作用,并且预注浆处理是在灌注桩施工前进行,不影响灌注桩施工时间,预注浆处理后,钻孔过程中无漏浆及塌孔现象,旋

挖钻机可一次成孔,不用重复钻进耗费时间,故采用预注浆处理的方式对岩溶进行处理可提高灌注桩施工功效,同时也可以降低混凝土浇筑超方量,对充盈系数降低起到一定的作用,并对灌注桩成桩质量起到一定的保障作用。同时由于注浆后对岩溶区域内的填充物有一定的固结作用,可有效预防掉钻、卡钻、大范围地面塌陷的现象,防止工程安全和质量事故发生。同时从其周边桩位的施工及浇筑情况看,因为注浆压力的存在及岩溶的贯通性,采用岩溶注浆(水泥浆)的方式对岩溶预处理,部分水泥浆可流至岩溶处理桩位周边桩位岩溶处,对其周边有岩溶的桩位也能起到一定的处理作用。

五、各种岩溶处理措施数据对比分析

(一) 各岩溶处理方式数据统计

表2 各岩溶处理方式相关数据统计

序号	桩号	成孔机械	岩溶处理方式	岩溶深度合计(m)	混凝土充盈系数	材料用量(m ³)	每米岩溶材料用量(m ³)	综合平均用量(m ³)
1	G1-274	旋挖钻机	岩溶注浆 (1:1水泥浆)	1.0	1.13	51.2	51.20	26.14
2	G1-281			1.2	1.31	60.5	50.42	
3	G1-287			4.5	1.25	65.4	14.53	
4	G1-37			6.0	1.27	41.2	6.87	
5	G1-43			7.3	1.34	56.1	7.68	
1	G1-95	旋挖钻机	岩溶注浆 (1:3水泥砂浆)	1.3	1.28	3.0	2.31	1.41
2	G1-52			1.6	1.45	2.0	1.25	
3	G1-19			4.7	1.27	6.0	1.28	
4	G1-23			6.5	1.30	7.2	1.11	
5	G1-25			7.2	1.32	8.0	1.11	

续表 2

序号	桩号	成孔机械	岩溶处理方式	岩溶深度合计 (m)	混凝土充盈系数	材料用量 (m ³)	每米岩溶材料用量 (m ³)	综合平均用量 (m ³)
1	G1-53	旋挖钻机	岩溶注浆 (C15 细石混凝土)	0.9	1.11	6.0	6.67	3.58
2	G1-235			1.9	1.12	7.5	3.95	
3	G1-26			4.2	1.15	10.2	2.43	
4	G1-45			7.3	1.18	15.2	2.08	
5	G1-34			8.0	1.20	22.0	2.75	
1	G1-220	旋挖钻机	永久性钢护筒 直径 800mm	1.5	/	未能安放成功, 此方式不适用于该工程。		
2	G1-234			2.9	/			
3	G1-275			4.4	/			
4	G1-286			6.2	/			
5	G1-290			7.5	/			

说明: 以上数据按岩溶处理方式实施的相关桩位进行统计。

(二) 该工程采用各种岩溶处理方式措施费用预估^[2]

根据超前钻结果, 有岩溶桩总数 4314 根, 平均岩溶深度约 4.08 米, 灌注桩平均有效桩长按 21.81m 计算, 直径 800

1. 岩溶注浆 (水泥浆) 的溶洞处理方式方面, 前期预注浆施工只选择部分单桩进行处理, 未进行大规模成片的注浆处理, 因为注浆压力的存在及溶洞的贯通性, 部分水泥浆流至溶洞处理桩位周边桩位溶洞处, 故平均每米溶洞材料用量相对较高, 约为 26.14m³/m; 根据本工程地质情况, 结合 G1、G2、G3 区 820 根桩用水泥浆注浆处理的实际情况, 本工程平均每米溶洞处理用水泥浆量约为 4.85m³, 混凝土充盈系数约为 1.14, 注浆总量约 85365.43m³, 加上混凝土量的费用, 总计约为 44816850.8 元;

2. 岩溶注浆 (水泥砂浆) 的溶洞处理方式方面: 前期通过岩溶注浆 (水泥砂浆) 的方式对溶洞进行处理效果不是很明显, 因本工程大多数溶洞内有软塑粉质黏土或砂砾等填充物, 溶洞空隙不大, 通过高压泵灌注水泥砂浆很难将其扩散至溶洞范围内, 同时水泥砂浆也难以对岩溶裂隙进行填充, 故平均每米溶洞材料用量相对较少, 约为 1.41m³/m (水泥砂浆并未扩散至溶洞内); 如采用此种方法对本工程溶洞进行处理, 处理方式与岩溶注浆 (C15 细石混凝土) 的溶洞处理方式类似, 处理方法为: 旋挖钻机钻孔钻进至溶洞处开始回填水泥砂

浆, 待静置 36 小时后再重新钻孔施工, 遇有多层溶洞需反复进行回填处理, 严重影响成桩速度, 同时因回填水泥砂浆压力较小, 无法足够量的挤入到有填充物的溶洞内, 二次成孔时可能会将回填的水泥砂浆全部掏出, 起不到处理溶洞的效果; 如施工中按上述溶洞处理方式对溶洞进行处理, 本工程平均每米溶洞处理用水泥浆量约为 5.80m³, 混凝土充盈系数约为 1.32, 注浆总量约 102086.50m³, 加上混凝土量的费用, 总计约为 55959761.5 元;

3. 岩溶注浆 (C15 细石混凝土) 的溶洞处理方式: 旋挖钻机钻孔钻进至溶洞处开始回填细石混凝土, 待静置 24 小时后再重新钻孔施工, 遇有多层溶洞需反复进行回填处理, 严重影响成桩速度, 同时因回填 C15 细石混凝土压力较小, 无法足够量的挤入到有填充物的溶洞内, 二次成孔时会将回填的 C15 细石混凝土全部掏出, 起不到处理溶洞的效果; 前期通过岩溶注浆 (C15 细石混凝土) 的方式对溶洞进行处理的桩位平均每米溶洞处理用 C15 细石混凝土量约为 3.58m³, 如施工按上述溶洞处理方式对溶洞进行处理, 混凝土充盈系数约为 1.55, 注浆总量约 102086.50m³, 加上混凝土量的费用, 总计约为 43982610.80 元;

4. 安放永久性钢护筒只能处理较小的溶洞, 遇较大的或多层溶洞成功率较低, 方法失效, 不做详细统计。

(三) 各岩溶处理方式功效分析

表 3 各种岩溶处理方式功效分析表

序号	岩溶处理方式	日平均进尺 (m)	预估总桩数 (根)	平均孔深 (m)	钻孔总深度 (m)	钻机最多投入数量 (台)	平均费用	预估工期 (天)
1	岩溶注浆 1: 1 水泥浆	34.5	5400	25.09	135486.00	24	2546.25	164
2	岩溶注浆 1: 3 水泥砂浆	8.5	5400	25.09	135486.00	24	2204.00	665
3	岩溶注浆 C15 细石混凝土	10.5	5400	25.09	135486.00	24	1288.8	538
4	永久性钢护筒 直径 800mm	/	/	/	/	/	/	/

说明: 1. 上表中日平均进尺 = 24 * 平均每小时进尺;

结语

岩溶处理方式很多, 根据地层情况选取合适的方式尤为重要。大型场地且岩溶呈串状的, 采用岩溶注浆 (1: 1 水泥浆) 方式, 混凝土超方量费用可控, 且施工费不会增加, 总费用最低, 工期用时最短, 对整个场地的固化有很好的效果。

参考文献

[1] 岩溶地区建筑地基基础技术标准. (GB/T 51238-2018).
[2] 湖南省房屋建设项目设计概算工程建设其他费用标准. (湘建建 (2024) 19 号).