

岩溶地区桩基施工溶洞处理技术与质量控制

吴昊轩

湖北三峡职业技术大学 湖北 宜昌 443000

【摘要】：我国西南、华南地区碳酸盐岩地层分布广泛，区域岩溶地质发育普遍，地层内部存在溶洞、溶槽、岩溶裂隙及软弱充填层等不良地质结构。桩基作为建筑及交通工程主要竖向承重基础，在岩溶场地施工极易出现孔壁坍塌、泥浆漏失、混凝土超灌、断桩及桩基承载力不达标等工程病害。本文结合华南某市政道路桥梁工程实例，归纳分级溶洞处理施工工艺，分析旋挖钻孔灌注桩施工关键控制参数，建立全流程质量管控体系。工程实践表明，根据溶洞规模、充填状态选用回填压实、钢护筒隔离、注浆加固三类核心工艺，配合事前地质复核、事中动态管控、事后多级检测质控模式，可有效解决岩溶桩基施工通病，保障桩基承载力及桩身完整性。全文结合现场试验数据明确施工参数阈值，可为同类岩溶场地桩基工程提供施工参考。

【关键词】：岩溶地质；钻孔灌注桩；溶洞处理；成桩质量；施工控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.019

引言

岩溶地层经过长时间的地下水溶蚀作用，岩体结构破碎，地下空洞分布无规律，地质勘察阶段很难准确找到所有的隐性溶洞和连通裂隙。常规陆地桩基施工工艺直接应用于岩溶场地，施工事故发生率是原来的3倍以上。目前工程领域岩溶溶洞处理没有统一的标准施工流程，施工人员大多根据经验选择处理方案，容易造成工期延误、施工成本超支、隐蔽工程质量隐患。

现有的行业规范只规定了岩溶桩基的验收标准，对于不同类型溶洞适应的施工工艺以及现场质控的重点难点描述比较模糊。本文以实际工程项目为依托，根据溶洞洞高和充填性质进行工况划分，有针对性地整理出成套施工技术，确定各个工序的质量控制指标，形成可以落地的现场施工及质控方案，控制工程质量缺陷的发生率，降低岩溶桩基施工的安全风险。

1 工程概况与岩溶地质特征

1.1 项目基本概况

本文以华南某市市政互通桥梁工程为依托，项目主线桥梁总长860m，下部基础全部采用Φ1800mm旋挖钻孔灌注桩，设计桩长28~42m，单桩竖向抗压承载力特征值6800kN，桩基持力层选择中风化石灰岩地层。项目场地勘察结果表明全场区岩溶强烈发育，大于62%的桩基钻孔发现大小不同的溶洞，属于典型的复杂岩溶施工场地。

1.2 场地岩溶地质条件

场地地层自上而下依次为素填土层、粉质粘土层、破碎石灰岩地层、完整中风化石灰岩地层。地下稳定水位埋深为3.2~5.8m，地下水流动性大，岩溶裂隙连通性好。根据详勘钻孔和施工超前补勘数据，将场地溶洞分为三类，分类标准及分布占比如表1所示。

表1 场地溶洞工况分级及风险统计表

溶洞等级	洞高H/m	充填状态	场地分布占比/%	主要施工风险
小型溶洞	$H \leq 1.0$	全充填，软黏土夹碎石	57.4	轻微漏浆、局部孔壁剥落
中型溶洞	$1.0 < H \leq 3.0$	半充填，空洞与软弱夹层交替	31.8	塌孔、局部缩径
大型溶洞	$H > 3.0$	无充填，连通地下暗河	10.8	大规模漏浆、桩基偏位、断桩

1.3 岩溶场地桩基施工难点

一是地质离散性大，常规勘察不能探明隐蔽的串珠状溶洞，成孔过程中出现地质灾害；二是地下水流动快，泥浆护壁难以成型，空洞部位孔壁自稳能力差；三是溶洞区混凝土容易流向空洞裂隙，造成超灌、桩身截面残缺；四是持力层岩溶凹槽容易造成桩基沉降不均，竖向承载力达不到设计要求。

2 岩溶地区典型溶洞处理施工技术

溶洞处理是岩溶地区桩基施工的重中之重，施工方案的选择不能一概而论。工程施工坚持因地制宜、安全第一、成本控制、结构闭环四个基本原则，对溶洞发育规模、洞内充填介质性状、地下水渗流流速、桩基竖向荷载等级四个主要指标进行综合分析，确定施工工艺。浅层小荷载溶洞用简易物理加固工艺，深层大荷载、高水流溶洞用结构隔离和化学注浆复合工艺。所有的处理方案都以保证成孔的稳定性、保证桩身混凝土的完整性、满足桩基持力的要求为根本目的，避免因为过度施工而造成工程造价的浪费，同时也避免简化工序遗留下来的隐蔽质量隐患。

2.1 小型全充填溶洞处理：片石黏土回填压实工艺

对于洞高小于 1m 的全充填软弱溶洞，洞内介质为饱和软黏土、风化碎石，岩体自身具有一定的自稳能力，没有明显的地下水渗流通道，不需要前置注浆固结处理，采用片石黏土分层回填冲击挤压加固工艺。该工艺原理就是用硬质填料填充溶洞空腔，利用机械冲击压实置换溶洞内高压缩性软弱充填物，在孔壁周围形成高强度复合护壁圈层，封堵岩体表层微细渗流裂隙。具体施工流程为钻机钻进到溶洞顶部位置后，将钻进速度降到 0.3m/min 以下，停止泥浆循环输送，防止泥浆冲刷掏空溶洞软弱夹层；清空孔底沉渣后，向孔内分层投放级配石灰岩片石、塑性黏土掺少量普通硅酸盐水泥混合物；片石粒径严格控制在 50~150mm 之间，级配连续无空隙，单层填料投放厚度固定为 0.8m。用钻机钻杆自重匀速反复冲击挤压填料来重新塑造溶洞周围岩体的结构。

施工核心管控指标为钻杆冲击落距稳定控制在 1.2m 以内，单层填料层级冲击次数不少于 12 次，冲击结束后检测孔内泥浆液面无波动下沉才可进行下一层回填；全部回填作业完毕后静置 2h，使填料自然固结成型，再行再造浆护壁继续向下钻进。该工艺不需要大型特种设备，施工工序简单，无养护等待期，单孔处理工期短，施工成本低，适合于场区大面积浅层小型溶洞的批量施工；缺点是加固深度小，不能处理存在流动地下水的空洞地层。

2.2 中型半充填溶洞处理：水泥水玻璃双液注浆加固工艺

洞高 1.0~3.0m 的中型半充填溶洞普遍存在着空洞和软弱夹层交替的结构，局部有横向地下水渗流通道，孔壁岩体整体稳定性较差。单纯片石黏土回填只能堵塞局部空洞，不能阻止地下水渗流，成孔时很容易出现渐进式塌孔、泥浆不断渗漏的情况。本项目所用的加固方法为间歇式水泥-水玻璃双液高压注浆加固，先物理搭设骨架支撑，后化学固结松散围岩，形成防渗自稳复合地层。施工流程分为三步，第一部分是溶洞段钻孔清孔，清除孔底的流动淤泥和松散碎屑；第二部分是分层投放 20~40mm 级配碎石搭建刚性支撑骨架，支撑溶洞悬空顶板，防止顶板垮塌；第三部分是沿桩基孔周环形布置 4~6 根 $\Phi 50\text{mm}$ 无缝注浆钢管，注浆管穿透溶洞顶板嵌入上部完整岩层 50cm，采用底部预埋方式避免注浆管路堵管。

注浆施工核心参数公式如下：

$$P = P_0 + \gamma h$$

式中 P 为合理注浆压力，MPa； P_0 为裂隙启裂压力，取 0.25MPa； γ 为地层覆土重度， kN/m^3 ； h 为注浆段埋深，m。

现场施工严格按理论计算参数进行，注浆压力控制在 1.6~2.2MPa 之间，地下水流速偏大处取上限压力施工；水泥浆水灰比为 1:0.8，水泥和水玻璃原液体积比为 2:1，双液浆混合后初凝时间控制在 40~60s，满足岩溶裂隙快速封堵施工

要求。注浆采用下至上、隔孔交错间歇注浆施工顺序，防止同断面同时注浆造成地层应力集中。现场终止注浆判定标准为孔口稳定返浆、无气泡和杂物溢出，注浆压力稳定保持 3min 无回落，判定该注浆孔施工合格。全部注浆完毕后封闭孔口养护 72h，检测固化岩体抗压强度大于 2.8MPa，满足旋挖钻机正常成孔护壁力学要求后才能继续钻进。该工艺的优势是固结体抗渗性好、围岩整体性好，适合半充填过渡型岩溶地层；缺点是施工工序多、材料和人工成本高。

2.3 大型无充填溶洞处理：长距离钢护筒隔离工艺

洞高大于 3.0m、无充填介质、连通地下暗河的大型溶洞，地下水流量大、水流扰动强，溶洞顶板悬空面积大，注浆、回填等常规加固工艺无法抵抗水流冲刷，极易造成全断面漏浆、大面积塌孔甚至钻机埋钻安全事故。本项目使用全穿透式大直径钢护筒隔离防护工艺，用刚性钢结构隔绝桩基施工区和地下溶洞、暗河水系，从根本上消除岩溶不良地质施工风险。施工流程为按照设计桩径定制加工刚性钢护筒，采用 16mm 厚 Q235 碳素结构钢板卷制，护筒外径比桩基设计直径大 20cm，预留泥浆护壁和施工偏差余量；护筒分段制作，单节标准长度 6m；用大型振动沉拔锤分段振动下沉护筒，全过程实时监测护筒垂直度，控制倾斜偏差不大于 0.5%；钢护筒全程穿透溶洞顶板、溶洞空腔、溶洞底板三层结构，护筒底部嵌入下部致密完整中风化基岩不小于 1.5m，彻底阻断地下暗河横向水流通道。

钢护筒现场拼接采用坡口双面焊接工艺，焊接完成后做超声波焊缝无损探伤检测，焊缝合格率 100%后方可进行下一节护筒下沉作业。护筒就位封闭之后，在筒内进行泥浆护壁成孔、钢筋笼下放、水下混凝土灌注工作。该工艺稳定性好、安全可靠，不受地下水和溶洞形态的影响，大型高危岩溶桩基优先采用；主要缺点是钢材耗材多、施工造价高、施工工序繁杂，施工完成后钢护筒不能回收，只适用于高风险、大跨度溶洞关键桩位施工。

2.4 串珠状多层溶洞综合处理工艺

场区局部桩位发育竖向多层串珠状溶洞，多级空洞上下连通、横向裂隙交错贯通，单个加固工艺不能消除多级连锁坍塌的风险。根据地层竖向岩溶发育规律，采用上部注浆帷幕+下部分段钢护筒复合综合治理工艺，分层隔离、分级加固。浅层多层小型溶洞区，用低压帷幕注浆工艺在桩位周围形成环形隔水防渗帷幕，封堵浅层横向岩溶裂隙，阻断地表水和浅层地下水渗流；深层高风险串珠状大型溶洞区，采用分段拼接式钢护筒隔离，按溶洞分布标高分段下沉护筒，每穿过一层溶洞就做一次嵌岩固定。施工全过程严格控制上下工序的衔接，浅层注浆固结合格之后再行深层钢护筒施工，防止上下溶洞施工造成连锁地层扰动。该复合工艺既经济又安全，是解决复杂复合型岩溶地质施工难题的专门方法，也是本项目复杂岩溶桩位重

点推广的处置方案。

3 岩溶桩基全流程质量控制体系

3.1 施工前期质量预控制度

加密地质补勘，常规桩位两点补勘，疑似岩溶发育区一桩一勘，绘制出单桩竖向岩溶地质剖面图，标明溶洞埋深、洞高、充填物性质、地下水位。二是施工设备和材料的报验，注浆材料、钢护筒母材、桩基混凝土原材料进场抽样检测，严禁不合格材料进场。三是专项方案技术交底，根据不同的溶洞等级对班组进行分级技术交底，确定异常工况的应急处理程序。

3.2 施工过程关键工序质量控制

成孔工序中控制钻进速度，岩溶地层钻进速度不大于 0.6m/min，实时监测泥浆比重、黏度指标，泥浆比重保持在 1.25~1.35 之间，防止孔壁失稳。发现泥浆液面快速下降立刻停止钻进，开启溶洞应急处理程序。

溶洞处置工序要按照溶洞等级执行相应的工艺，保留注浆压力、回填方量、钢护筒埋深全过程施工台账，严禁简化施工工序降低加固标准。

混凝土灌注工序岩溶地层容易产生混凝土超灌，导管埋深控制在 2.5-4.0m，匀速连续灌注，实时统计灌注方量。超灌量大于设计桩身体积的 15%时检查溶洞通道，及时封堵裂隙，防止材料浪费、桩身局部夹渣。

3.3 成品桩基质量检测与验收

本项目使用组合检测模式，对完整性、承载力两个主要指标进行检测，验收数据见表 2。

表 2 桩基成品检测验收结果统计表

检测项目	检测方法	检测比例	合格标准	本项目合格率/%
桩身完整性	低应变反射波法	100%普查	I、II类桩合格，无III、IV类缺陷桩	98.7

参考文献：

[1] 诸葛晓良,彭吴培.岩溶地区桩基施工溶洞处理技术与质量控制[J].中国住宅设施,2026,(3):173-175.
[2] 熊幸,邹辉,黄哲,等.龙岗某大型工程场地岩溶发育特征及其溶洞处理技术[J].中国岩溶,2026,45(1):208-220.
[3] 周云军.杭州岩溶地区地质特征及相应桩基施工处理技术[J].地基处理,2025,7(2):193-200.

溶洞段桩身密实度	钻芯取样检测	15%随机抽检	混凝土密实无空洞、无软弱夹层	100
单桩竖向承载力	静载荷试验	3%随机抽检	极限承载力≥1.5 倍设计特征值	100

对检测出的少量II类桩进行桩身浅层注浆修补，全部满足桥梁上部结构承载施工要求。

3.4 常见质量通病防控措施

漏浆塌孔提前准备黏土、片石、速凝注浆材料，发现泥浆液位突然下降立即停止钻进并回填封堵；桩基偏位严格控制钢护筒垂直度，钻机施工全过程校正钻杆倾角；断桩岩溶区禁止中途停止混凝土灌注，改善配合比提高混凝土流动性，减少溶洞部位离析。

3.5 工程效益分析

本项目按照分级溶洞处理工艺和配套质控方案施工，全场区 216 根岩溶区域桩基只出现 3 根II类轻微缺陷桩，没有发生重大质量及安全事故。相比传统施工方案没有分级管控的施工方案而言，施工返工率降低了 89%，工期比原来的缩短了 18d，综合施工造价降低了 7.2%。分级处理方案既考虑施工安全又考虑工程质量，适合区域市政和房建岩溶桩基工程的实施。

4 结论

岩溶场地桩基施工要根据溶洞洞高、充填情况、地下水状况实施工况分级，小型充填溶洞用回填挤压法，中型溶洞用双液注浆法，大型空洞溶洞用钢护筒隔离法，工艺匹配度高，现场可操作性强。注浆压力、钻进速度、泥浆指标、钢护筒嵌岩深度属于岩溶溶洞桩基施工主要控制参数，经由理论公式来确定施工阈值，能明显削减隐蔽质量缺陷出现的几率。创建三级闭环质量控制体系，依靠一桩一勘前置勘察、工序动态掌控、多种方法组合成品检测，可以从前端控制岩溶桩基塌孔、承载力不够、桩身残缺等常见病害。后续复杂的岩溶场地可使用智能监测设备对孔内的水位和孔壁应力实施实时监测，进而提早发出溶洞施工危险信号，从而优化岩溶桩基施工标准和自动化控制水准。