

基于电磁波 CT 扫描技术岩溶地质勘测及处理施工技术

霍九坤

武汉市市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要] 灰岩地质岩溶较发育, 对地下工程施工安全、质量影响较大。通常岩溶地质采用高密度电阻率法、地质钻探、地质雷达等技术勘测, 存在受地下障碍物影响大、勘测深度有限、勘测准确度较低、效率较低、适用场地有限等问题, 在后续施工中可能因此导致技术经济损失。本篇文章结合某地区某穿湖顶管工程总结利用地质介质力学参数及电学参数的差异, 根据不同地层电阻率高低折射出的电磁波吸收度差异反映地质情况的差异, 准确地勘测地下岩溶发育情况, 形成基于电磁波 CT 扫描技术的岩溶地质勘测及处理施工技术, 解决了湖底岩溶发育区地下工程施工难题, 为工程质量、安全均提供了较高的保证, 降低了施工风险, 同时也形成了一定的经济效益。

[关键词] 电磁波; CT 扫描技术; 岩溶地质; 勘测及施工

DOI: 10.33142/ec.v7i1.10871

中图分类号: P631

文献标识码: A

Karst Geological Survey and Processing Construction Technology Based on Electromagnetic Wave CT Scanning Technology

HUO Jiukun

Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: Limestone geological karst is relatively developed, which has a significant impact on the safety and quality of underground engineering construction. Usually, karst geology is surveyed using techniques such as high-density resistivity method, geological drilling, and geological radar. However, there are problems such as being greatly affected by underground obstacles, limited survey depth, low survey accuracy, low efficiency, and limited applicable sites, which may lead to technical and economic losses in subsequent construction. This article combines the summary of a lake crossing and pipe jacking project in a certain area, utilizing the differences in geological medium mechanical and electrical parameters, reflecting the differences in geological conditions based on the electromagnetic wave absorption refracted by different geological resistivity levels, accurately surveying the development of underground karst, and forming a karst geological survey and processing construction technology based on electromagnetic wave CT scanning technology, which solves the problem of underground engineering construction in karst development areas at the bottom of the lake, which provides high assurance for engineering quality and safety, reduces construction risks, and also generates certain economic benefits.

Keywords: electromagnetic waves; CT scanning technology; karst geology; survey and construction

1 工程概况

某穿湖顶管管道工程采用顶管法施工, 管道直径为 DN2400mm 和 DN3200mm, 穿湖段长 2km, 岩溶发育区长度 1.5km, 详勘阶段勘察有 56 个勘探孔揭露有灰岩, 灰岩里揭露有溶洞的钻孔有 16 个, 钻孔见洞率 28.6%, 本次勘探范围内岩溶发育程度为中等发育。钻孔揭露溶洞主要为充填溶洞, 充填物为黏性土及灰岩碎块, 部分岩溶埋深较浅且洞顶距管道底面的距离小于 1 倍管径。因顶管施工穿越岩溶发育区时存在顶管姿态骤变、卡壳、透水等施工风险。为保证施工安全和质量, 对溶洞发育区采用 CT 扫描探测+袖阀管注浆工艺进行超前填充处理。

2 工艺原理

通过利用地质介质力学参数及电学参数的差异原理, 根据电阻率高低对电磁波吸收度差异特性, 采用电磁波法、CT 扫描、地质勘探等手段探测地下工程和结构影响范围内岩溶溶洞大小及发育特点, 并将地质钻孔作为注浆孔,

采用袖阀管注浆对下覆溶洞进行注浆充填预处理。

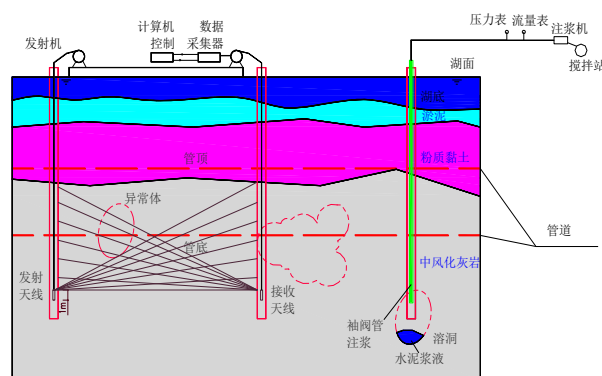


图 1 基于电磁波 CT 扫描技术探测及溶洞处理图

3 施工工艺流程及操作要点

3.1 施工工艺流程

施工工艺流程参见图 2。

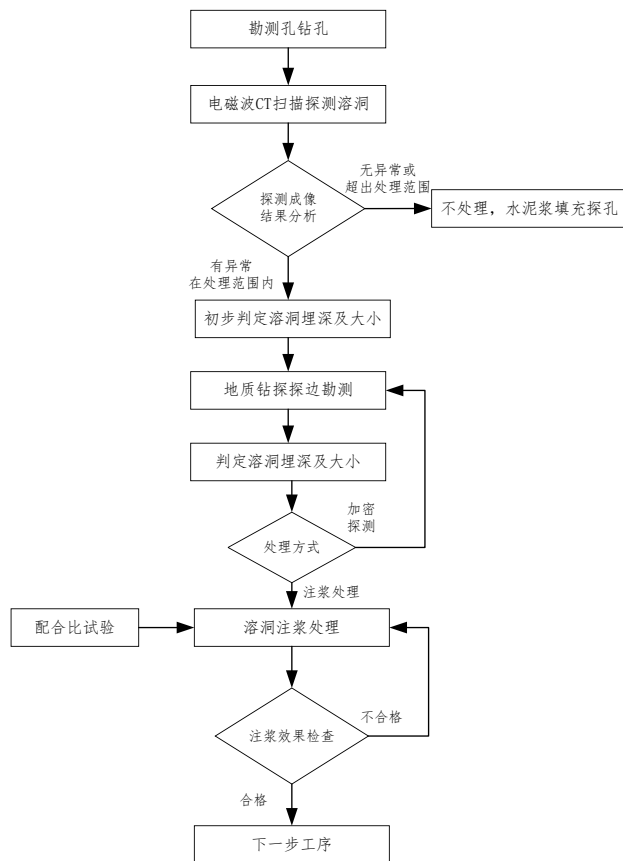


图2 基于电磁波CT扫描技术的岩溶地质勘测及处理施工工艺流程图

3.2 操作要点

3.2.1 勘测孔钻孔

(1) 地下工程管道施工前, 结合地质勘察报告, 初步界定电磁波CT扫描的区域范围。

(2) 在界定的电磁波CT扫描区域范围内进行地下管线勘测调查, 若管线与勘测孔存在冲突需进行调整勘测孔位置或对管线进行改迁。

(3) 按照横向间距 $10\text{m} \leq L_1 \leq 20$, 轴向间距 $10\text{m} \leq L_2 \leq 20$ (确保扫描剖面距离 $L \leq 30\text{m}$) 沿管道两侧布置CT扫描勘测孔, 并按照灰岩面以下25m钻探成孔(勘测深度根据工程需要控制在 $H \leq 50$)。布孔原则如图3所示。

(4) 钻孔采用XY100型钻机, 勘探成孔直径100mm, 成孔后下放直径100mmPVC套管。

3.2.2 电磁波CT扫描探测溶洞

(1) 通过位于管道两侧CT扫描勘测孔, 采用仪器为HX-DHH-01B型井中大功率程控电火花震源、HX-JDT-02型井下无线电波透视仪(探头直径75mm, 发射探管长度830mm, 接收探管长900mm)、HX-PZT-S45Q12型井中检波器串等设备, 在一个孔发射电磁波射线, 另一个孔放入接收机, 通过射线扫描发射孔与接收孔之间岩面成像。将扫描信号转换成的图像进行编辑, 从而得到电磁波视吸收系

数断面图。在电磁波视吸收系数剖面成果资料中, 岩溶洞穴区、岩体破碎及裂隙发育区, 吸收系数表现为高值异常。通过对探测现象进行资料分析, 采用色谱图示法将采集信息转成图像。电磁波CT扫描原理图如图4所示。

(2) 电磁波CT扫描: 在CT扫描勘测孔施工完成后, 在检测断面的两侧采用一孔发射另一孔接收的观测方式, 观测系统为定点、全扫描观测系统, 测量点距为1.0m。采用扫频测量方式, 天线长度2.5m, 根据试验选择频率4MHz、8MHz、12MHz天线采集数据。两孔间距控制在25m以内, 进行岩面扫描探测。

(3) 资料处理: 读取场强幅值, 依据测量资料计算每条射线的激发和接收点坐标; 根据地质地球物理条件、观测系统、成像精度、分辨率和任务要求选择和建立数学物理模型; 网格单元尺寸不应小于测点间距, 单元总数不宜大于射线条数; 模型的初始值和约束条件可由已知地质条件、经验值、现场试验计算等方法得出; 反演算法采用联合迭代法(SIRT), 根据迭代次数选择最稳定的成像结果; 采用色谱图示法进行CT图像。

(4) 成果分析: 遵循“电磁波CT视吸收系数愈小, 岩体性状愈好, 反之愈差。”的规律, 物探CT成果图进行分析、解释, 确定物探CT地质剖面中的异常。

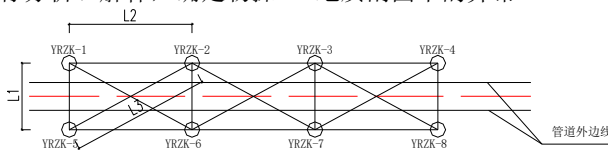


图3 CT扫描勘测孔平面布置图

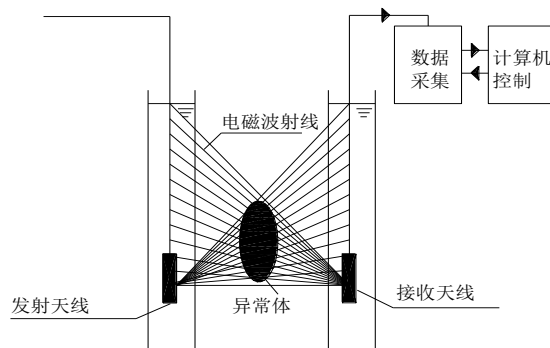


图4 电磁波CT扫描原理图

无异常区或发现异常区已超出处理范围CT扫描勘测孔采用0.5:1浓水泥浆注浆充填。

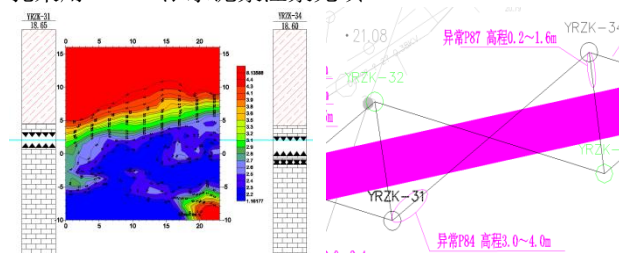


图5 CT扫描成像分析

3.2.3 初步判定溶洞埋深及大小

电磁波 CT 扫描是采取地下扫描探测, 探测区域不受地下既有管线干扰, 探测精细度高、分辨率高, 根据 CT 扫描成像结果可以初步判定溶洞埋深、大小、填充物情况, 溶洞与拟施工地下工程位置关系等, 为下一步探边勘测提供基础依据。

3.2.4 地质钻探探边勘测

根据初步判定溶洞大小, 对在处理范围内的溶洞进行钻孔探边勘测。钻孔勘测采用采用钻孔采用 XY100 型钻机, 勘探成孔直径 110mm。探边勘测孔布置原则为:

(1) 对于钻孔揭示岩溶洞穴高度不大于 1m 溶洞, 一般在已揭露溶洞的勘探钻孔处布置钻孔 1 孔, 如图 6 图 A;

(2) 对于钻孔揭示岩溶洞穴高度 1m~2m 的溶洞, 应围绕已揭露溶洞的勘探钻孔呈十字型布置钻孔 4 孔, 间距 2.0m×2.0m, 如图 6 图 B;

(3) 对于钻孔揭示岩溶洞穴高度大于 2m 的溶洞, 应围绕已揭露溶洞的勘探钻孔呈梅花型布置钻孔不少于 5 孔, 钻孔应深入稳定地层 0.5m 以上, 间距 2.0m×2.0m, 如图 6 图 C、D、E;

(4) 施工中, 一般以揭示到溶洞的详勘钻孔为基准点, 边钻边灌边找边界, 以找到溶洞洞体边界为止。每个已发现的溶洞注浆孔数量不宜超过 3 个, 其余不进行注浆出来的钻孔应用水泥浆进行及时地封闭出来。

(5) 钻进及提取芯样时, 应密切记录以下情况: ①岩样完整度: 观察岩样是否存在裂隙、完整度情况; ②填充物情况: 根据渣样进行分析, 看渣样是否出现异常变化, 如入岩后出现粘土等填充物情况; ③钻进情况: 钻进过程中, 是否存在掉钻、钻进速度发生突变等; ④岩样摆放及编录: 按照提取岩样标高摆放芯样, 同时做好信息编录。

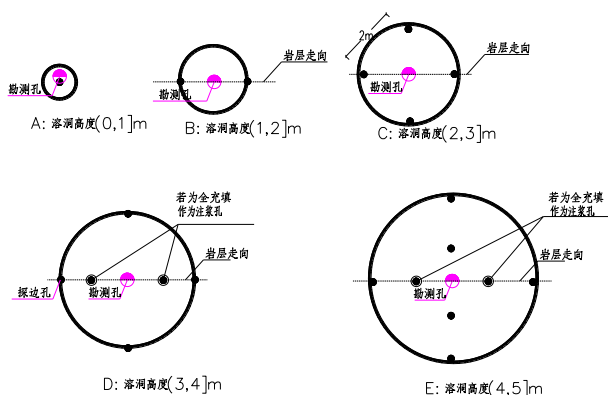


图 6 溶洞探孔布置大样图

3.2.5 判定溶洞埋深及大小

结合 CT 扫描成像分析和勘察探边摆放排列, 核准每个溶洞的洞径、分部大致形态、是否填充及填充物类型。同时, 根据岩溶探边绘制溶洞发布草图, 现场邀请监理单

位、跟踪审计单位、业代签字审批。

3.2.6 溶洞注浆处理

(1) 处理原则: 根据管道周围岩溶地质条件受工程扰动的程度将管道周边划分为岩溶地质高风险区和低风险区 2 个区域。高风险区: 管道侧面外 0.5 倍洞径, 底板以下 1 倍洞径范围内; 低风险区: 管道顶部 0.5 倍洞径, 底板以下 1 倍洞径范围外。注浆处理的重点为高风险区。

(2) 溶洞注浆方式:

①对于溶洞高度介于 [0, 1m], 揭露溶洞的勘探钻孔为注浆孔 (如图 6 A);

②对于钻孔揭示岩溶洞穴高度介于 [1, 3m], 沿岩层走向间隔 2m 钻探探边 (如图 6 B 和 C), 并作为注浆孔;

③对于钻孔揭示岩溶洞穴高度介于 [3, 6m] 或溶洞高度大于 6m 的特大型溶洞, 应围绕已揭露溶洞的勘探钻孔, 间距约 2.0m×2.0m 布置探边孔并作为注浆孔 (如图 6 D 和 E) 或根据专家意见设置投石孔; 若注浆压力始终达不到要求, 可在外围适当增加钻孔进一步确定溶洞大小, 并进行注浆处理。

(3) 岩溶溶洞处理采用袖阀管注浆工艺, 注浆材料选用水泥浆, 水泥选用 P.042.5 普通硅酸盐水泥, 水泥浆水灰比为 0.5:1~1:1。

(4) 注浆顺序: 注浆顺序采取先低后高、由外到内约束一开放型方式, 即先注溶洞最外侧后注内侧, 隔孔交替进行, 以控制浆液扩散范围, 保证注浆效果。

(5) 注浆控制: 注浆采用注浆量和注浆压力双控指标, 注浆量按照溶洞理论体积的 120% 控制, 注浆终止压力保持在 0.3~0.5MPa, 灌浆压力应随着灌浆过程逐步提高, 达到设计灌浆压力并继续注浆 30min 以上。终止注浆时必须返浆。

(6) 封孔: 灌浆封孔采用“压力灌浆封孔法”, 浆液采用水灰比为 0.5:1 的浓水泥浆, 为确保封孔质量, 避免后期钻孔遗留安全隐患, 封孔长度为湖底以下 10m。

3.2.7 注浆效果检查

(1) 根据设计要求对岩溶注浆区域进行抽芯检测, 查看注浆填充效果。

(2) 对溶洞处理采用钻孔取芯为主, 压水试验为辅进行灌浆质量检查; 对洞径大于 2m 的溶洞必须进行质量检查, 布置 2 个质量检查孔, 其余溶洞处理按照总数 10% 进行溶洞灌浆质量检查, 布置 1 个质量检查孔。钻孔取芯后做抗压试验, 注浆固结体 28d 的无侧限抗压强度 ≥ 0.15MPa。

(3) 溶洞加固处理后质量检查孔压水试验透水率应不大于 10Lu, 合格率 85% 以上, 其余不合格孔段的透水率最大值不超过 15Lu, 且不集中。

(4) 质量检查孔的压水检查工作应该单元工程灌浆结束后 7 天后进行。质量检查孔压水结束后应采用“压力

灌浆封孔法”，浆液采用水灰比 0.5:1.0 的浓水泥浆。

(5) 顶管在穿越岩溶发育区内，不发生因溶洞区域填充不饱满或强度不足而导致的顶管姿态骤变、机头栽头等事宜。

4 质量控制

4.1 质量控制要点

4.1.1 电磁波 CT 扫描

(1) 勘测区域施工前，对地下管线进行专项调查，核实管线信息及与勘测孔位置关系，避免出现施工引起的管线破坏。(2) CT 扫描勘测孔深度控制在灰岩面以下 20~25m。(3) 扫描勘测孔横向间距 8~10m，纵向间距 20m。

(4) 设备使用前进行自查，测试过程按照 5% 的数量进行重复观测，且其相对误差小于 5%。(5) 电磁波 CT 重复观测绝对误差在 3dB 以内。(6) 射线测量点距为 1.0m，误差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 。(7) 探边钻探做好钻进记录，如实记录：钻速、是否掉钻、取芯完整度、填充物情况等。(8) 应用天线频率 4MHz、8MHz、12MHz 天线采集数据，发射、接收频率应当一致，选用的天线要与发射、接收频率配合，同一测区应选用相同频率。

5.1.2 溶洞注浆填充处理

(1) 注浆采用袖阀管后退间歇式注浆，袖阀管溶洞洞径范围内管壁上钻 $\Phi 8@300\text{mm}$ 花眼，每次注浆段长 0.5m，注完第一段浆段后，上提注浆芯管，进行第二注浆段注浆施工。

(2) 注浆控制：注浆采用注浆量和注浆压力双控指标，注浆量按照溶洞理论体积的 120% 控制，注浆终止压力保持在 0.5MPa，灌浆压力应随着灌浆过程逐步提高，

达到设计灌浆压力并继续注浆 30min 以上。终止注浆时必须返浆。

(3) 封孔：灌浆封孔采用“压力灌浆封孔法”，浆液采用水灰比为 0.5:1 的浓水泥浆，为确保封孔质量，避免后期钻孔遗留安全隐患，封孔长度为湖底以下 10m。

5 结论

采用本施工工艺进行岩溶溶洞预处理，可以全面、准确地排查施工区域岩溶情况，并进行注浆填充，填充范围较好控制。避免了管道施工过程中顶管机、盾构机等设备姿态发生骤变、无法纠正和施工发生透水的施工风险，同时也避免了因此引起的工期及经济损失，为施工工期和施工安全均提供了较好的保障。

施工工艺适用范围更广，陆地、湖面等岩溶溶洞探测均可适用；电磁波 CT 扫描岩溶探测无干扰、精细度高、分辨率高，可将溶洞大小探测误差控制在 5%~10%，钻探探边可提高效率约 80%；采用超前预报、注浆填充的方式，为地下工程提供施工良好基础，确保施工安全和质量，降低施工风险。

[参考文献]

[1] 段成刚. 富水岩溶隧道暗河段洞内数字测绘技术[J]. 中国水运, 2023(11): 157-160.

[2] 郭建. 岩溶地质条件下桥梁桩基的施工技术浅谈[J]. 四川水泥, 2017(12): 9.

作者简介：霍九坤（1990.3—），男，毕业院校：中国矿业大学（北京）；所学专业：建筑与土木工程，当前就职单位武汉市政建设集团，职务分公司副职，职称级别中级工程师，主要从事地下空间工程施工技术研究、管理。