

Groundwater control during construction of rock and soil collapse control project in karst area

Yao Wang Binhe Xu

Liaoning Province Geological Mineral Survey Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110034, China

Abstract

Karst regions typically present complex geological conditions, where construction projects for landslide control face severe groundwater challenges such as sudden water surges, mudflows, and pipe gushing. These issues not only jeopardize construction safety and progress but may also trigger secondary geological disasters. This study investigates groundwater management during landslide control projects in karst areas. It first highlights the critical importance of groundwater management during construction phases, then analyzes the unique hydrogeological characteristics of karst regions and the specific challenges encountered. Subsequently, technical measures for effective groundwater control are explored. The research provides scientific guidance for managing groundwater during landslide control projects in karst areas, ensuring both construction safety and environmental stability.

Keywords

karst area; collapse control project; construction period; groundwater control; technical measures

岩溶地区崩塌治理工程施工期地下水控制

王瑶 徐彬赫

辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 中国 · 辽宁 沈阳 110034

摘 要

岩溶地区的地质条件通常比较复杂, 其崩塌治理工程的施工期面临着非常严峻的地下水问题, 如突水、涌泥、管涌等等。上述问题不仅影响着施工安全与进度, 甚至还可能引发次生的地质灾害。为此, 本文针对于岩溶地区崩塌治理工程施工期的地下水控制展开了相关的研究, 先阐述了施工期地下水控制的重要性, 再分析了岩溶地区地下水的赋存特征及施工期面临的地下水挑战, 随后探讨了施工期地下水控制的技术措施。本次研究的意义上为岩溶地区崩塌治理工程施工期的地下水控制提供科学的参考, 保障工程的施工安全与环境的稳定。

关键词

岩溶地区; 崩塌治理工程; 施工期; 地下水控制; 技术措施

1 引言

岩溶地区的碳酸盐岩广泛比较分布, 其经长期溶蚀作用形成了复杂的地下空洞、裂隙网络和暗河系统, 此地区地下水的赋存与运移规律极具特殊性。而崩塌作为该区域常见的地质灾害, 其治理工程施工往往需在破碎岩体、富水地层中进行, 那么地下水的干扰便成为了影响工程顺利实施的关键因素。实际施工的过程中, 若对于地下水的控制不当, 就极有可能引发突水涌砂、边坡失稳、地基承载力下降等问题的出现, 不但会延误工期、增加成本, 更会对施工人员的安全构成严重的威胁。

2 岩溶地区地下水赋存特征及施工期地下水挑战

2.1 岩溶地区地下水赋存特征

岩溶地区地下水的赋存状态是漫长地质作用与水文过程共同作用的结果, 其呈现出“空间分异显著、动态变化剧烈”的独特性。若从储存空间来看, 碳酸盐岩经亿万年溶蚀形成的三维网络系统极具复杂性: 在微观上, 岩体中发育着密度达 10-50 条 / 米的毫米级裂隙, 虽然这些裂隙的宽度多在 0.1-2mm 之间, 但却构成了地下水渗透的主要通道; 中观层面则存在直径 5-10 米的溶洞与溶沟, 其中填充着粉质黏土或碎石, 形成了局部富水囊; 宏观上, 存在大型的暗河系统纵横交错, 甚至部分暗河宽度可达 5-20 米, 流量随季节的波动可达 10-100m³/s。上述这种多级储水结构, 导致同一钻孔在不同深度可能会出现“干-湿-干”的交替现象, 哪怕相邻 5 米的两个监测点水位差也可达 10 米以上^[1]。

【作者简介】王瑶（1991），女，满族，中国山东定陶人，本科，工程师，从事工程地质研究。

地下水与地表水的水力联系则具有“双向快速交换”特征。当大气降水落到地表之后，约 30% ~ 60% 会通过落水洞、岩溶漏斗直接灌入地下，其补给速度是非岩溶区的 5-10 倍。贵州某监测数据显示，一次 50mm 的降雨可使地下水位在 2 小时内上升 3-5 米。同时地下水还会通过泉眼、暗河出口排泄至地表水体，进而形成“地表地下一体化”的水循环系统。在云南某岩溶流域监测中表明，流域内 80% 的地表径流均来自地下水排泄，而雨季时地表水体又会通过倒灌补给地下水，导致水位年变幅可达 15-30 米，旱季水位甚至可能低于地表 20 米以下。

而径流路径的“随机性与定向性并存”是另一显著的特征。像裂隙发育均匀的区域，地下水一般会沿多个方向缓慢地渗透，渗透速度通常为 0.1-1m/d，但当遇到连通性好的溶洞或暗河时，水流速度可骤增至 5-20m/d，一次呈现出“管道流”的特征。湖南某示踪试验显示，荧光剂在暗河系统中 12 小时内迁移了 15 公里，表明这种快速径流使得污染物能在短期内扩散至很远范围。此外因溶洞坍塌、泥沙淤积等原因，使得部分径流路径被周期性地阻断，形成了“暂时性滞流区”，致使地下水化学特征出现了剧烈的变化，如 pH 值在短距离内可从 6.5 升至 8.0。

2.2 施工期面临的地下水挑战

2.2.1 突水灾害

崩塌治理工程施工对岩溶地下水系统的扰动，可能会引发一系列的连锁反应，最终形成多维度的工程风险。其中，突水灾害的突发性与破坏性最为突出，因为施工开挖或爆破作业一旦触及未探明的富水溶洞或暗河，高压地下水便会瞬间突破岩体的约束，其涌水量可达数百甚至数千立方米每小时。

2.2.2 细颗粒迁移

地下水渗透所引发的“细颗粒迁移”问题，在实践当中直接威胁着工程结构安全。由于岩溶区覆盖层多为含砂率 30%-50% 的松散堆积物，因此当水头差超过 0.5m 时，地下水就会携带砂粒沿裂隙或孔隙流动，进而形成管涌。某抗滑桩施工当中，因桩孔底部遭遇了岩溶裂隙水，24 小时内涌出细砂达 80m³，导致桩底的沉渣厚度超标，施工团队不得不采用高压喷射注浆进行地基加固，额外增加了成本 120 万元。

2.2.3 环境连锁效应

施工排水带来的“环境连锁效应”同样地不容忽视。所谓“环境连锁效应”，是为了降低地下水位而采用大规模的抽水，然后形成直径数百米的降落漏斗，导致周边地下水补排平衡被打破。此外，岩溶地下水常溶解大量 CO₂，在抽水过程中气体逸出非常可能引发局部缺氧环境，而某些矿区附近的地下水甚至还含有 H₂S 等有毒气体，浓度可达 5-20mg/L，一旦突然被释放会危及施工人员的健康^[2]。

2.2.4 季节性水位波动

季节性水位波动对于施工进度的干扰具有“周期性与不确定性”。在雨季时，地下水位急剧上升可能会淹没基坑，迫使停工，而旱季水位的下降又可能导致原本封堵的裂隙重新开启，此时便会形成新的渗水通道。同时这种动态变化还会使钻孔灌注桩在成孔过程中出现“干孔-涌水干孔”的反复，影响到了混凝土的浇筑质量，增加了断桩的风险。

3 施工期地下水控制技术措施

3.1 超前探测与水文地质勘察

施工前的超前探测与水文地质勘察在目前是破解岩溶地下水“隐蔽性”难题的关键，其需构建“空一地一井”的立体探测体系。该体系的关键之一是物探技术的选型，需结合探测深度与精度要求分层进行实施。其中地表层采用无人机航测结合高分辨率遥感影像，用于识别落水洞、岩溶漏斗等宏观地貌标志，从中圈定地表汇水区域与潜在地下水补给通道；中浅层（0-50 米）则以地质雷达与高密度电法为主，地质雷达建议选用 100-500MHz 的天线，此方式对灰岩裂隙带与小型溶洞的分辨率可达 0.5 米，能清晰地识别充填型溶洞的界面特征，而高密度电法通过布设 2-5 米电极距的测线，能够可生成电阻率剖面，一次将富水区（电阻率 < 50Ω·m）与相对贫水区（电阻率 > 200Ω·m）进行精准地划分；深层（50-200 米）则采用地震折射波法，即经由分析纵波传播速度的差异，来推断大型暗河与溶洞的分布范围，其探测误差一般可控制在 5% 以内。

另一关键则是钻探工作，应当执行“探采结合”的原则，即采用 XY-2 型岩芯钻机配 Φ130mm 金刚石钻头，实行“跟管钻进+孔内成像”工艺^[3]。展开来说：当钻进至溶蚀发育段时，就立即下入 Φ110mm 的套管隔离，目的是防止孔壁坍塌，同时通过孔内摄像头来观察溶洞充填物状态（如流塑状黏土、块石堆积或空洞），并测量地下水位埋深与水头压力。对于水文试验则需分阶段开展，一般初始阶段通过单孔稳定流抽水试验，采用 Thiem 公式计算出渗透系数，但若发现了多层含水层，则需要进行多孔干扰抽水试验，以此确定各含水层的水力联系。

3.2 排水降压技术

排水降压方案需遵循“分层控制、按需降压”的原则，需要根据地下水埋藏条件构建起多级的排水系统^[4]。首先是对于覆盖层厚度 < 5 米的浅层潜水，建议采用截水沟+集水井+移动式排水的系统，即沿施工区周边设置 0.8 米 × 1.0 米（宽 × 深）的梯形截水沟，沟内采用 M7.5 浆砌片石衬砌，沟底则铺设 20cm 厚级配碎石反滤层。同时在基坑四角布置直径为 1.2 米、深 3 米的集水井，内置 Φ150mm 潜水泵，但扬程不低于 10 米，单泵抽水量 ≥ 50m³/h，且要配备 2 台备用泵以应对突发涌水。其次针对岩溶裂隙承压水，应该实施管井+降压廊道进行联合控制，当中管井徐

采用 $\Phi 325\text{mm}$ 螺旋焊接钢管, 滤水管段的长度也不小于 6 米, 缠丝间隙为 0.5mm, 填砾粒径是 2-5mm, 井深一定要穿透承压含水层底板 3-5 米。而井群的布置需要采用“梅花形”布点, 单井控制半径可通过抽水试验进行确定, 一般为 8-15 米, 且单井出水量需达到设计涌水量的 1.2 倍以上。当含水层渗透性系数 $< 10\text{m/d}$ 时, 应先采用高压旋喷注浆形成厚度 ≥ 1.5 米的止水帷幕, 要求旋喷桩搭接的宽度不小于 30cm, 浆液水灰比为 1:1-1:1.5, 这样才能确保帷幕渗透系数 $\leq 10^{-6}\text{cm/s}$, 再结合管井排水便形成了“内排外堵”的降压体系。最后是暗河系统的集中涌水, 最优解是采用封堵 - 导流 - 分流的三段式处理, 在暗河入口处浇筑 C25 的混凝土塞, 将其嵌入基岩深度 ≥ 1.5 米, 中部则预留 $\Phi 200\text{mm}$ 的钢质导流管, 且管端安装闸阀用于控制流量。沿暗河走向则平行于施工导流隧洞, 断面尺寸建议 $2\text{m} \times 2.5\text{m}$ (宽 \times 高), 并采用喷锚支护将涌水引至施工区外 500 米以上的安全区域。此外还应在隧洞内设置分水闸, 当涌水量超过设计值时, 便通过支管分流至临时蓄水池, 以避免直接排放引发的下游冲刷。

3.3 防渗堵水技术

防渗堵水离不开“地表 - 地下”立体的防护体系, 该体系使得“源头控制、过程拦截”得以实现。就地表防渗而言, 其重点在于处理汇水区域: 在施工区上缘 5 米处设置截水天沟, 断面则采用矩形设计, 宽 \times 深 = $1\text{m} \times 0.8\text{m}$, 采再用 C20 混凝土进行浇筑, 每隔 10 米设伸缩缝, 填缝材料建议采用沥青木丝板; 对坡面松散层还需采用挂网喷浆进行处理, 铺设 $\Phi 8\text{mm}$ 钢筋网, 网格间距 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 为宜, 喷射 C20 细石混凝土, 厚度为 8-10cm, 然后每隔 5 米设置 $\Phi 50\text{mmPVC}$ 排水孔, 孔深是 3-5 米且倾角 $10-15^\circ$, 如此才能将坡面渗水集中进行导出。

在地下防渗方面则以注浆加固为核心, 需要根据岩溶的发育程度选择差异化的工艺: 对裂隙宽度 0.5-5mm 的细微裂隙可采用超细水泥注浆, 一般水泥细度 $45\mu\text{m}$ 筛余 $\leq 5\%$, 水灰比 0.8:1-1:1, 注浆压力在 1.0-1.5MPa 之中, 进而通过劈裂作用填充裂隙网络; 对宽度 5-50mm 的中粗裂隙, 建议采用水泥 - 水玻璃双液浆, 其体积比为 1:1-3:1, 初凝时间需控制在 30-60 秒内, 以确保能够快速封堵水流通道; 对直径 $> 50\text{cm}$ 的大型溶洞, 则要采“级配骨料填充 + 注浆固化”的工艺, 先填入 5-20cm 块石至溶洞体积的 $2/3$, 再注入水泥 - 粉煤灰浆液 (掺量 30%), 注浆管应采用 $\Phi 108\text{mm}$ 的钢管, 再分段提升注浆, 每段高度为 1.5 米, 如此便能确保浆液充分地填充了骨料间隙。

3.4 动态监测与应急处置

动态监测系统应具备“水量 - 水位 - 变形”多参数协同监测的功能, 为此需要构建智能化的预警平台。具体来说:

监测点地布设需遵循“关键区域加密”原则, 即在抗滑桩、挡土墙等结构物周边 5 米范围内, 每 20 米设置 1 个自动水位监测仪, 并采用 RS485 总线来传输数据, 监测精度可达 $\pm 1\text{cm}$, 采样间隔一般为 15 分钟。而在暗河入口、大型溶洞上方, 应当设置超声波流量计, 将测量范围控制在 $0-5\text{m}^3/\text{s}$ 内, 精度为 $\pm 2\%$, 用于实时地记录涌水量的变化。同时在施工区周边 1 公里范围内要布设 20 个沉降观测点, 在其中采用 GNSS 监测技术, 平面精度为 $\pm 3\text{mm}$, 高程精度是 $\pm 2\text{mm}$, 每日观测 1 次, 以此捕捉地表变形的趋势^[5]。

上述监测数据均通过无线传输至监控中心, 系统将自动地生成水位 - 时间曲线、涌水量变化直方图及沉降速率等值线图。一旦出现以下情况, 便会触发预警: 第一水位单日降幅 > 0.5 米、涌水量突增 30% 以上、沉降速率 $> 5\text{mm/d}$, 针对该情况应在急物资储备当面实行“三级储备”制度, 即现场储备 2 台备用潜水泵 (流量 $\geq 100\text{m}^3/\text{h}$)、5 吨速凝水泥、200 条沙袋及 50 米帆布软管, 项目部储备注浆设备 1 套、柴油发电机 2 台, 协作单位应储备长臂挖掘机 1 台、应急钻探设备 1 套, 进而能够确保应急响应时间 < 1 小时。

4 结语

基于上述所述可知, 岩溶地区崩塌治理工程施工期的地下水控制是一项复杂的系统工程, 其需充分地认识岩溶地下水的赋存特征与施工扰动的相互作用。随后通过超前探测掌握水文地质条件, 再采用排水降压、防渗堵水等技术措施, 辅以完善的管理保障与动态监测, 就能有效地应对施工期的地下水挑战。但实际工程中, 应根据具体的地质条件制定个性化的方案, 并要注重技术措施的协同应用与动态优化, 同时还需兼顾环境保护要求。往后随着探测技术与数值模拟方法的发展, 岩溶地区地下水控制将变得精准化、智能化, 其将为崩塌治理工程的安全实施提供更有力的技术支撑, 推动着岩溶地区地质灾害防治水平的整体提升。

参考文献

- [1] 张加桂. 三峡地区泥灰质岩石斜坡带岩溶作用及其对工程稳定性的影响[J]. 地球学报, 2005, 26(06): 565-569.
- [2] 李天雨. 管道一裂隙型岩溶地下水流场特征及径流通道参数辨识研究[D]. 山东省: 山东大学, 2022. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2022.006457.
- [3] 胡克. 富水岩溶隧道涌水与围岩稳定性研究 —— 以薄刀岭隧道为例[D]. 贵州省: 贵州大学, 2024. DOI: 10.27047/d.cnki.ggudu.2024.000526.
- [4] 安小亮. 水利水电工程施工场地地下水污染的控制与修复研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(12): 100-103+108.
- [5] 赵瑜, 胡波, 陈海林, 等. 岩溶隧道工程修建对地下水环境的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(05): 1-8. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.001.