

# 岩溶地区地下工程建设对地下水渗流的影响分析

文 / 李文溢 中铁第一勘察设计院集团有限公司

**摘要：**岩溶地区地下水系统具有高度复杂性和脆弱性，地下工程建设活动对该系统的渗流特征产生显著影响。本文通过分析岩溶地区地下水渗流的基本特征，系统探讨了地下工程建设过程中对地下水渗流场、水化学环境以及岩溶发育的影响机制。研究表明，地下工程施工会改变原有地下水流场分布，引发水位下降、流向改变等问题，同时可能诱发岩溶塌陷、泉水断流等地质环境问题。针对这些影响，提出了渗流监测、帷幕注浆、排水系统优化等综合防控措施。

**关键词：**岩溶地区；地下工程；地下水渗流；水文地质；影响分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.018

## 引言

随着城市化进程加快，地铁、隧道、地下商业空间等地下工程建设需求持续增长，岩溶地区的地下空间开发面临诸多挑战。地下水渗流是岩溶地区水文地质过程的核心环节，其运动特征直接影响着岩溶发育、地下水资源利用以及工程安全。工程建设活动通过开挖、支护、排水等施工行为，打破了原有的水文地质平衡，导致地下水渗流场重新分布。因此，深入研究地下工程建设对岩溶地区地下水渗流的影响机制，对于科学评估工程环境影响、制定合理的防控措施具有重要意义。

### 一、岩溶地区地下水渗流特征

碳酸盐岩经过漫长岁月的溶蚀雕琢，内部早已千疮百孔，从微裂隙到能行船的地下暗河，各种尺度的空隙交织成一张极其复杂的渗流网络。水在这样的介质里运动，行为模式差异巨大，在致密的基岩部分，地下水只能沿着细密的裂隙网络艰难前行，渗透系数低到 $10^{-7}$ 米每秒的量级，符合经典的达西定律，一切都显得循规蹈矩。一旦进入溶蚀扩大的管道系统，情况就完全改变，水流速度陡然飙升至每秒数米，呈现紊流特征，这种戏剧性的转变造就了岩溶地下水对外界刺激的敏感反应，场暴雨过后，地下水位可能在几小时内暴涨数米，而抽水影响又会沿着隐藏的管道迅速传递到很远的地方。此外，含 $CO_2$ 的地下水具有强烈的溶蚀能力，水流集中的地方通道就被不断扩大，形成一种强者愈强的正反馈<sup>[1]</sup>。水位的季节性起伏在岩溶地区尤为夸张，丰水期时落水洞疯狂吞水，泉水喷涌而出；枯水期则只能靠基岩裂隙里的勉强维持。

### 二、地下工程建设对渗流场的影响

当基坑或隧道一点点向下掘进，原本在岩溶介质里按部就班流动的地下水突然发现前方出现了一个真空地带，水力梯度的驱使下自然往这个新鲜的开挖面汇集。岩溶地区本就藏着无数管道溶洞，一旦挖到这些封闭系统被瞬间打通，涌水来势之猛往往超出预期。施工方试图用围护结构把水挡在外面，地连墙、灌注桩一圈圈打

下去，这些人造屏障在接缝处、与基岩咬合面都存在薄弱点，面对溶洞暗河这样的大通道根本拦截不断。降水井昼夜不停地抽，把水位压到开挖面以下才算安全，但在岩溶地区，这个降落漏斗的形状不是规整的圆锥，而是顺着管道裂隙伸出好几条触手，有的方向影响几百米，有的方向能延伸好几公里。原本饱水的溶洞被疏干，地下水储备减少，注浆堵水时又会产生新问题，浆液把裂隙溶洞填得密密实实，渗透性大幅降低，地下水只能改道而行。被堵死的区域成为隔水层，周围的水力梯度陡然增大，在注浆帷幕外侧可能会催生出新的渗流集中带。等工程建成投用，那些混凝土结构永久性地占据地下空间，渗流场的改变也就固化下来。

### 三、对地下水水化学环境的影响

工程施工把岩溶地下水的化学平衡打乱，深层地下水和浅层地下水应该互不相通，前者在地下矿化度高、离子浓度大，后者跟地表关系密切、更新快、成分相对简单。开挖降水搅和导致这两路水体被迫混在一起，离子重新组合，水化学类型就会改变。更关键的是，抽水加快了地下水的循环节奏，水和岩石接触的时间被大幅压缩，原本需要几十年才能达到的溶滤平衡现在几个月就能完成，硬度和离子浓度自然跟着往下掉。施工现场也会带进一些其他杂质，水泥浆液灌进去，地下水的pH值和碱度就会往上涨。施工机械漏的油、废水里的悬浮物和化学药剂，稍有不慎就渗进地下水系统，岩溶地区的管道四通八达，污染物在里面一直乱窜，自净能力跟不上，下游的泉水和地下河很快就会遭受影响，周边居民的饮水安全直接受到威胁。氧化还原条件的翻转同样不容小觑，那些原本封闭在深处的地下水，缺氧环境下保持还原状态，工程一旦开挖，通风系统把大气氧带进来，整个氧化还原体系就会产生变化。二价的铁锰离子碰上氧气会氧化成三价，生成黄褐色的氢氧化物沉淀，不仅堵塞渗流通道，还在混凝土表面留下斑斑锈迹。含硫地层更是敏感，氧化环境下硫化物分解产生硫酸，这酸性水对岩石和工程结构的腐蚀性很大。地下工程内部的温

度跟着季节和人工调节上下波动，与周围岩体始终保持着温差，热量在地下水里来回传递，虽然影响不剧烈，但日积月累对水的物理化学性质还会产生微妙的改变<sup>[2]</sup>。

#### 四、对岩溶发育的诱发作用

降水把水位压下去后，原本泡在水里的溶洞裂隙突然暴露在空气中，形成了包气带，雨水渗下来时携带着二氧化碳，溶蚀能力比饱和地下水强得多，对岩石的啃噬速度明显加快。水位降落还让地下水流速提高上来，水流冲刷的机械作用跟着增强，溶蚀通道扩张的步伐越走越快。降落漏斗范围内的潜水面上下波动，岩石在这个带里反复经历干湿交替，溶蚀效果会更好。渗流路径一旦被改道，注浆帷幕或者工程结构把原有通道堵死，地下水只能在那些原本水流稀拉的裂隙里开始发力，长此以往，这些通道就会发育成新的溶洞暗河。此外，岩溶塌陷问题，水位降下来，溶洞顶板失去了水的浮托，上面覆盖的土层和破碎岩石扛不住自重就垮下来，如果溶洞埋得浅，塌陷会一路传到地表，地面上出现大坑，房子路面都会遭殃，如图1所示。

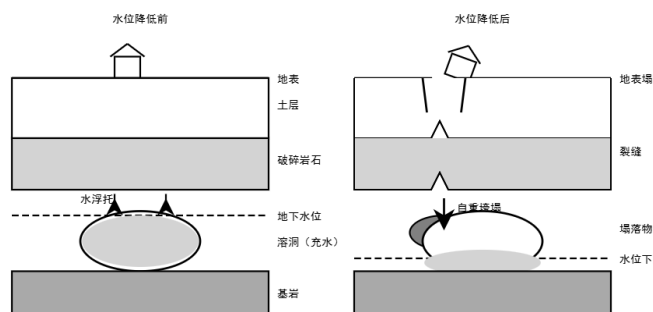


图1 岩溶塌陷形成过程示意图

#### 五、影响范围与程度的控制因素

在溶洞暗河密布的强发育区，地下水渗透性良好，工程施工时，扰动就顺着管道网络飞速传开，几公里外都能感受到。反之，弱发育区主要靠裂隙渗流，影响圈子自然收得很紧。即便是同一片区域，不同位置的岩溶发育状况也天差地别，尤其是那些顺着岩层溶蚀出来的含水带，呈层状或似层状分布，工程若切到这些高速通道，影响会沿着含水带一路上升。工程自身的体量和施工手段也是硬指标，大型深基坑挖得深、摊得广，降水抽得猛、时间拖得长，对地下水系统的冲击自然猛烈。长距离隧道更加麻烦，一路穿过多个水文地质单元，每个单元的地下水都被搅和，累积效应相当可观。在施工方法上，明挖法要大范围降水，波及面积很大；盾构法相对封闭，对周边地下水比较柔和；钻爆法简单粗暴，震动和爆破把岩体裂隙撑大，渗透性跟着飙升，涌水问题也就突出。补给条件决定了系统的自愈能力，水源充足的地方，即便降水把水位压下去，停工之后很快就能恢复过来。但是补给本来就不行，过度降水把含水层抽干，

水位很难回到从前的状态。雨季和旱季的差别也很明显，雨季补给足，降水影响相对温和。地质构造在背后操纵着地下水的分布和流动格局，断层褶皱既可能是导水的高速路，也可能是阻水的关卡，工程穿过断层破碎带时突水风险陡增，影响范围沿着断层伸展开去，向斜核部、背斜顶部这些特殊构造部位施工，面临的地下水问题更是严峻<sup>[3]</sup>。

#### 六、综合防控措施

##### (一) 准确查明水文地质条件

岩溶地区的地下情况复杂，在开工前必须对具体情况了解清楚。钻探中钻孔不能浅尝辄止打到设计面就收工，必须往深处再延伸一段，把下面藏着的含水层以及出水能力调查清楚。地质雷达、瞬变电磁这些技术能够透视地下，把隐藏的溶洞和富水带揪出来，正好弥补钻探只能点对点的局限性。示踪试验也具有很多优势，往落水洞里撒荧光染料或者放点同位素，追着地下水的足迹跑，就能明白岩溶管道的连通关系，这些信息对评估工程影响范围非常关键。勘察资料要综合分析，单看某一种方法容易漏掉重要信息，钻探、物探、水文试验三管齐下，相互印证，才能把岩溶发育规律、地下水赋存状态、各含水层之间的水力联系真正理清楚，给后续的设计和施工打下基础。

##### (二) 帷幕注浆技术

注浆是在基坑周边或者隧道掌子面前方密密麻麻钻一圈孔，把水泥浆液或化学浆液压进去，让它充填裂隙和溶洞，织成一道连续的止水屏障。孔距打多密、孔打多深、注浆压力给多大、用水泥浆还是化学浆，都要根据岩溶发育特点精细计算，既要保证止水效果，又不能浪费材料。遇到大型溶洞时空腔太大，浆液灌进去填不满，这时需要先往里面扔块石、碎石当骨架，把空间占住，再用浆液封堵剩下的缝隙。注浆完成后必须做压水试验检验效果，看渗透系数降到的程度，哪些部位还在渗漏，一旦发现薄弱点就要及时补强加固，直到形成可靠的防水帷幕即可<sup>[4]</sup>。施工过程中还要观察浆液的扩散范围，防止跑到不该去的地方，堵死原本正常的排泄通道。

##### (三) 优化降水方案

降水井的位置应该尽量贴着开挖边界布置，如果离得太远还一直抽，影响范围就会扩大。可以采用分段分层降水法，不能把整个含水层疏干，先降上面的部分，下面的暂时留着，等施工推进到哪一层再降哪一层。降水深度和时间也要卡死，满足施工要求就可以，不能过分追求干燥，水位压得太低反而容易出问题。施工完成那一段要及时停泵，让地下水自己恢复，这样可以节省很多麻烦。有条件的地方可以做回灌，把抽出来的水通过回灌井再打回外围含水层，相当于给地下水系统补给，

能明显减缓水位下降速度,缩小影响范围。回灌井的位置要选在降落漏斗边缘,形成一道水力屏障,阻止漏斗继续扩张。这些操作虽然增加了成本,但可以避免后续可能出现的岩溶塌陷、泉水断流等问题,从长期来看更有利。

### (四) 排水系统设计

工程涌出来的水不能随便往外排,必须有组织、成系统地处理。排水沟、集水井要定时修理,把水引导到指定位置集中处理,不能在工地里四处漫流,这样不仅影响施工,还容易渗回地下造成二次污染。排水出口关卡也要严格,沉淀池、过滤装置都要配齐,把悬浮物、泥沙这些杂质先过滤掉,水质达标后才能往地表水体或市政管网里排。如果施工废水里混着油污、化学药剂这些特殊污染物,就要采取专门的处理设施,如隔油池、中和池、生化处理等,达到标准后再进行排出。此外,排水量和水质也要定期监测,取样化验,进一步观察 pH 值、COD、重金属含量是否在安全范围内,这些数据还能反映排水对周边环境的影响程度,一旦超标就要及时调整处理工艺。有些工程为了省事直接把水排进附近的河沟,短期内看不出问题,长时间排水就会导致水生态系统受损,还需要进一步处理。排水系统设计必须到位,一方面是环保的要求,一方面也是对工程长期安全负责。

### (五) 建立全方位监测体系

监测井需要提前布好,施工前测准初始水位,作为后续对比的基准线。井的数量和位置也有考究,可能受影响的主要区域都要覆盖到,居民水井、岩溶泉、重要建筑附近这些敏感点更要加密布设,并经常性进行观测。除了观察水位外,水质变化同样重要,应该定期采样分析离子成分、pH 值、有机污染指标,看工程活动有没有改变地下水的化学特征。地面沉降监测能抓住岩溶塌陷的苗头,用水准测量或者 InSAR 这些技术定期测量地表高程,哪个点下沉速率异常就要立马拉警报。监测数据要及时整理分析,画成曲线图表,变化趋势一目了然。发现水位下降超过预警值、水质恶化、地面沉降加速这些异常情况,需要马上排查原因,不断调整施工方案,加强防护。此外,监测还能从事后评估和责任认定提供证据,一旦工程出现纠纷问题,实测数据就会成为证据。

### (六) 应急处置预案

岩溶地区施工会遇到很多突发情况,如突水涌水、塌陷垮塌等险情,如果没有应急预案就会加大事后成本。预案前需要做足功课,把可能出现的各种险情罗列清楚,每种险情的预警标准、指挥负责人、如何处置等都要写明白。应急物资也要提前采购到位,尤其是经常使用的抢险沙袋、快凝堵漏材料、大功率排水泵等都需要备齐,放在随时能取用的地方<sup>[5]</sup>。指挥体系也要建起来,总指

挥、负责现场调度人员、联系外部救援等都要分工明确,这样出现事故后能够第一时间找到相应人员,也能及时了解实际情况,并采取有效措施,不会出现慌乱。除了纸面预案外,还可以定期进行演练,模拟一些经常性的问题,如遇到突水情况该如何去堵、塌陷后要怎样撤离,让参与人员熟悉各个流程,真正做到熟练于心,同时检验预案是否有漏洞,才能从根本上提高安全。演练完成后应该及时进行总结,在演练中哪些环节容易出现的问题,不同物资需要采购的数量,以及遇到危险时能否快速反应并解决,这些都是演练考核的重点,在每次演练后都要及时修正完善。如果在工程中遇到险情时,预案就是最直接的预防方式,按部就班执行,可以将损失降到最低。事后负责人还要及时做复盘分析,险情发生的原因、预案执行效果、如何预防以及后期避免等,把经验教训记录下来,下次就能做得更好,并不断提升应急能力。

### 结语

岩溶地区地下工程建设对地下水渗流产生的影响是多方面、长期性的,涉及渗流场变化、水质演变、岩溶发育等诸多过程。有效防控这些影响需要采取综合措施,从勘察、设计、施工到运营全过程强化管理。当前研究还存在一些不足,需要进一步深化。未来应加强岩溶地区地下工程建设的环境影响机理研究,发展更加精细的数值模拟技术,提高影响预测的准确性。推动监测技术和监测设备的创新,实现地下水系统状态的实时感知和智能预警。探索生态友好型的工程防控技术,在保障工程安全的同时,最大限度减少对地下水资源和生态环境的损害,实现岩溶地区地下空间开发与水资源保护的协调发展。

### 参考文献

- [1] 张为社. 岩溶地区深长隧洞突水机理研究 [D]. 导师: 焦玉勇. 中国地质大学, 2022.
  - [2] 王阅章, 李鸣, 宿成智, 张立爽, 闫少泽. 岩溶地区隧道施工灾害防治 [J]. 中国科技信息, 2020, (23): 34-35.
  - [3] 常涛. 岩溶地区多管道涌水注浆扩散封堵模式与治理方法研究 [D]. 导师: 李海燕. 山东大学, 2020.
  - [4] 江思义, 吴福, 刘庆超, 李海良, 潘晓丽. 岩溶地区建设用地地质环境适宜性评价——以广西桂林规划中心城区为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(06): 84-93.
  - [5] 李海燕. 大流量岩溶管道涌水封堵机理与方法研究 [D]. 导师: 陈卫忠; 李术才. 山东大学, 2018.
- 作者简介: 李文溢, 1996 年 1 月, 男, 汉族, 河南省宁陵县, 硕士研究生, 工程师, 现从事工程及水文地质勘察工作。