

岩溶地区工程地质问题及处理措施研究

覃自龙

武汉科铁人才发展有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要] 岩溶地貌特殊复杂的地质环境对工程建设具有极大的考验力度, 如岩溶塌陷、溶洞空洞、不均匀沉降以及突水等地质问题时有发生。文章全面总结分析了我国岩溶区的分布概况, 并重点探讨了我国岩溶地区普遍存在的主要工程地质病害产生机理及表现特点, 基于此针对岩土体加固、洞穴封闭、防渗导流、稳定加固和综合防治等方面提出了一系列有效的工程治理对策, 希望能为岩溶地区的工程建设起到一定的借鉴作用。

[关键词] 岩溶地区; 工程地质问题; 岩溶塌陷; 溶洞处理; 地基加固

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19552

中图分类号: P642.253

文献标识码: A

Research on Engineering Geological Problems and Treatment Measures in Karst Areas

QIN Zilong

Wuhan Kette Talent Development Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: The special and complex geological environment of karst landforms poses great challenges to engineering construction, such as karst collapse, cave cavities, uneven settlement, and water inrush, which often occur. The article comprehensively summarizes and analyzes the distribution of karst areas in China, and focuses on exploring the mechanisms and characteristics of the main engineering geological diseases that commonly exist in karst areas in China. Based on this, a series of effective engineering governance measures are proposed for rock and soil reinforcement, cave closure, anti-seepage and diversion, stable reinforcement, and comprehensive prevention and control, hoping to provide some reference for engineering construction in karst areas.

Keywords: karst areas; engineering geological issues; karst collapse; cave treatment; ground reinforcement

引言

岩溶也叫喀斯特, 是由水对可溶性岩石进行的一种以化学溶解为主的综合地质作用。岩溶地质环境特殊的地质条件容易产生一系列复杂的工程地质问题如地基不均匀沉降、基坑变形、地下室漏水等等, 极端情况下会造成地基失稳, 建筑物破坏等现象。中国岩溶分布区域较广, 在基础设施不断完善的今天, 更多的建筑会在岩溶地区兴建起来。合理解决岩溶地区的工程地质问题是工程地质研究的重要内容之一。

1 岩溶地区的分布特征

中国的岩溶分布很广, 在全国的各省市均可见到碳酸岩层出露, 中国喀斯特地貌总面积为 130 万 km^2 , 其中西南喀斯特地貌连片分布面积达到 55 万 km^2 , 包括了广西、云南、贵州等地。西南岩溶地区是中国三大岩溶集中分布区之一, 而且是最广阔、也是最活跃典型的岩溶分布地区, 我国碳酸盐岩出露地表面积有 125 万 km^2 , 而埋藏在地下则更多。从岩溶发育形态来说, 南方岩溶主要是裸露型和

覆盖型, 发育有峰林、溶洞、地下河以及天坑等多种典型地貌, 岩溶发育强烈, 地下河系发达。我国中南及西南岩溶区, 河床下切深、坡度陡, 地表水地下水流速较大, 有利于建设大型水利水电工程。北方岩溶多为潜伏式, 发育条件较差, 呈岩溶大泉的形式出现, 也有工程问题。根据 2023 年初公布的岩溶地区第四次石漠化调查结果, 截至 2021 年, 全国石漠化土地面积为 722.32 万公顷, 占岩溶面积的 14.92%。与 2016 年相比, 5 年间石漠化土地净减少 333.08 万公顷, 年均缩减率为 7.72%, 环境敏感, 对工程建设的总体适应能力的要求较高。

2 岩溶地区主要工程地质问题分析

2.1 岩溶塌陷问题

岩溶塌陷是岩溶区最常见的, 最危险的工程地质问题。岩溶地面塌陷的发生具有四个要素: 岩溶、地下水及触发条件、覆盖层(土层)条件。岩溶为土体的流失提供路径和储存场所; 土质决定了土体的塌落形式。从塌陷原因可分为土洞型、沙漏型以及泥流型三类。土洞型塌陷发生在

粘性土层和密实的砾砂层,由于受到外界荷载的作用使土洞顶板拱效应破坏造成地面塌陷;沙漏型塌陷是由松散砂粒在重力作用下逐渐漏掉造成;泥流型塌陷是由软土向可溶岩石中流失造成的。岩溶塌陷发生的诱因有自然与人为两大类。自然原因有暴雨、地下水位涨落等等。人为原因有:水源抽取地下水、地下工程建设以及基桩钻孔等行为。据统计,目前全国70%以上的岩溶塌陷是由于人类的工程建设,在人口集中分布区及其周围的公路、铁路等交通线路上,岩溶塌陷会对人们的生命安全及财产造成直接影响。

2.2 溶洞与地下空洞问题

溶洞是岩溶发育的经典结果,形状多样、大小不一,有几毫米的微小溶隙也有几百米的大溶洞。溶洞的存在导致了地层失去了连续性和完整性,给桩基施工和隧道开挖带来了很大的麻烦。溶洞按充填情况可以分为空溶洞、半充填溶洞和全充填溶洞三种类型:空溶洞内为空腔,强度很低;半充填溶洞充填物压缩性差;全充填溶洞虽被粘土等充填着,但在承重或者地下水的作用下也会发生压缩、潜蚀现象。如溶洞较大,溶体内充满大量泥砂并富含地下水,在揭露后极易造成大面积的突水、突泥,应该采取全封闭灌浆加固法^[1]。在岩溶地区发育强烈的地方进行桩基施工的时候遇到溶洞容易引发漏浆、坍孔等一系列比较严重的现象。溶洞与溶洞之间大多通过溶蚀裂缝彼此相连,构成了复杂交错的地下溶洞系统结构使工程更加复杂化。有一些特大型溶洞的高度达到几十米之高,洞内高填土或者桥梁跨越都十分艰难,耗费巨大成本,甚至要变更线路方案。

2.3 地基不均匀沉降问题

岩溶地区的地基有严重的不均匀沉降。岩溶地质体其横向差异很大,沿水平方向岩溶发育程度不同造成地基土力学性能相差很大;竖向则溶沟溶槽及溶洞出现的位置不一样,使得地基的承载能力很不同,容易造成不均匀沉降。从而引起建筑物墙体变形甚至倾斜倒塌,对使用产生严重影响。岩溶地基的不均匀表现为基岩面上地形变化很大,溶沟、溶槽纵横交错,溶洞的分布杂乱无章等,造成同一建筑物上不同的持力层条件有很大区别,在高层建筑载荷的作用下,如果基础没有穿过溶洞区或者没有进行处理加固就很可能出现差异沉降的情况。引起不均匀沉降的主要因素有:基底承载力低而且地层复杂不一、地下水的浮力以及溶蚀作用等等。对在岩溶地区的一个高层建筑不均匀沉降的情况,在现场勘查中认为主要是由于基底承载力低,同时土层又很复杂以及地下水的浮力还有溶蚀

等因素造成的。对已经产生的不均匀沉降的建筑物可以采取锚杆静压桩或地基灌浆加固等方式来处理,另外由于地下水位年间的波动所造成水浮力的变化也增加了沉降差值。

2.4 地下水渗漏与突水问题

岩溶地区地下水发育好,岩溶地下水漏失及突涌水危险性大。岩溶体突水来势凶猛、强度极大,一旦发生往往会导致巨大的人员伤亡和财产损失。隧道通过岩溶发育地带,如果不提前做好充分的超前地质探测以及加固措施,则容易揭露高压富水溶洞而导致突水突泥突沙灾害的发生。在岩溶区域挖掘超大面积基坑,当岩溶层深度小且地下水丰富的时候,易出现基坑底板突水,产生涌泥、涌砂等情况,严重的会发生基坑坍塌,危及周边环境的安全。还有就是在深基坑工程施工中的地下连续墙接合部位出现问题或者存在溶隙连通的情况下,地层中的水会渗入到基坑内部致使基坑底部产生涌水、流砂等危害。郑万高铁小三峡隧洞采取梁拱跨越+外封内挖+防护加固综合整治措施,对地表河床进行浆砌,洞内溶洞地段设排水沟,降低地表水下渗量、排除隧底高水压积水。岩溶水处理与否也决定着整个工程的安全问题以及其长期使用过程中能否保持良好状态。

2.5 岩溶发育的不确定性与隐蔽性问题

岩溶发育的最大特点就是它的高度不确定性和隐蔽性。岩溶塌陷常常是不确定性的,隐秘性以及突然性的。因为岩溶的发育是受岩性、构造以及地下水动力等因素的影响,所以岩溶的分布规律比较难掌握。而岩溶空洞深埋地下,地面不易观察到,一般的方法很难对其进行全面的查明。若在不清楚有无岩溶发育的情况下进行工程施工就会引起桩基强度不够,掉桩、断桩甚至引起地面沉降等严重事故的发生。岩层发育的不均匀性体现在同一场地内发育程度差异很大,相邻钻孔之间会呈现出很大的不同,这为勘探设计造成了很多麻烦^[2]。所以,运用多种方法综合查找岩溶发育状态是最基础的任务。调绘工作首先可以对岩溶发育做出初步的结论;综合物探方法可以圈定岩溶的形态范围;钻探可以验证物探的异常区域。建立调绘、物探、钻探、孔内三维扫描、水文地质试验等多种组合方式的综合勘察方法,能够很好地解决岩溶发育隐蔽性和复杂性的缺点,做到精细勘察的效果。

3 岩溶地区工程处理措施研究

3.1 地基加固处理技术

岩溶地貌区基础加固应根据不同的地质情况选择不同的加固措施,对于表层发育的岩溶地带可以采用强夯的

方法进行处理,通过强夯能量破碎表层溶洞顶盖以及夯实其上部覆盖土层,增强地基整体承载性能;对于一定深度范围内松散充填地带可以采取高压旋喷注浆的方式,利用高压喷射流切削搅拌充填物并与水泥浆液结合产生高强度桩体,增大局部承载能力;桩基穿洞法也是对深层溶洞的一种较好的治理方法,使桩端通过溶洞落于稳固基岩之中,保证上部结构荷载能有效地传递到底部可靠的持力层内。岩溶区端承型刚性桩复合地基技术,适用于在强岩溶区桩基础无法找到足够的持力层的情况下,通过使用端承型刚性桩复合地基的方式能够获得很高的地基承载力,从而建造成高层建筑。而在溶洞发育广泛以及充填物质量差的区域,则可以通过采用灌注桩加桩端后注浆的技术来增加桩端的承载力及桩侧摩阻力。

3.2 溶洞处理技术

隧道溶洞处理应结合溶洞大小、形状、充填情况以及其与隧道衬砌的空间位置分别加以分析,在此总结不同溶洞处理方法及相应的适用范围如下:

表1 溶洞处理技术对比

溶洞类型	处理技术	主要工艺	适用条件	关键技术要点
小型空溶洞	充填法	灌注碎石混凝土或低标号混凝土	溶洞高度<2m,顶板较薄	控制灌注压力,确保充填密实
中型空溶洞	注浆法	水泥浆或水泥-水玻璃双液注浆	溶洞高度2~6m,无明显动水	梅花形布孔,分序注浆
大型空溶洞	梁板跨越法	钢筋混凝土梁板跨越溶洞区	溶洞高度>6m,难以完全充填	梁板两端置于稳定基岩上
全填充溶洞	注浆固结法	高压注浆固结充填物	充填物为软塑—流塑状黏土	注浆压力3~5MPa,控制浆液扩散范围
动水溶洞	膜袋注浆法	膜袋包裹袖阀管注浆	溶洞与暗河连通、浆液易流失	膜袋物理阻隔,控制浆液流失
溶洞群	综合处理法	充填+注浆+跨越组合	溶洞密集分布、相互连通	分层分区处理,逐段推进

针对充填式溶洞与土洞,则应提前做好充填加固工作,保证上方的岩土体稳定;利用梁跨越方式能够越过岩溶裂隙带或溶洞破坏部位,为后续施工提供可靠支撑条件。桩基础施工过程中如果出现漏浆或者塌孔的情况,可以应用片石黏土水泥筑壁法、素混凝土回填法、钢护筒跟进法以及预注浆法等多种方法进行综合处理。对于隧道所遇充填型溶洞问题,可以从大管棚超前支护、小导管径向注浆、钢管桩及旋喷桩处理等方面综合施策。施工组织安排上,可以采取跳打法来降低震动影响,注浆作业严格按照规定

操作控制压力大小以及灌注速度。

3.3 防渗与排水处理措施

防渗及排水是岩溶区建筑工程的重点问题,在隧道工程中,富水岩溶段的防水排水是难点问题之一。在基坑工程施工中,采用地下连续墙加帷幕注浆是最常见的防渗方法,通过在地下连续墙外面或者底部施作水泥土帷幕隔断地下水补给通道,在岩溶洼地或地表汇水区应做好地表截排设施,避免地表水集中冲刷导致地面塌陷的发生,而在深基坑中突涌水的情况发生后,对小裂缝渗漏现象可以采取引流注浆封堵办法,对于严重的渗漏应该采用坑外深孔注浆、坑内反压回填等方法^[3]。单独一种处理手段效果不好而且还具有一定隐患。超前地质预测、初期支护加固、反压回填、封闭灌浆、增加泄水孔等多项措施综合应用最为理想;另外,在建筑工程地基内设置盲沟排水系统与泄水孔可以有效的使地下水位下降,减少浮托作用在建筑物基础上带来的不利因素。

3.4 地基稳定性控制技术

基础稳定性的控制分为承载力验算、变位控制及长期监测三部分。在承载力验算时需要依据勘察成果分析岩溶基础破坏方式,在溶洞顶板薄的情况下要验算顶板的受弯、受剪、受冲切承载力。变位控制方面可以采取桩基穿过溶洞区域将力传递给稳定的支承层,或者采用筏型基础加桩基组合的基础形式增强整体的整体性以及减少不均匀沉降。对岩溶发育体位置形态进行雷达探测及钻孔取芯分析之后,把基础区分为较为稳定的部分、相对不稳定部分及不稳定部分,在不稳定部分进行注浆加固,观测地基沉降不超过10mm。针对已经出现不均匀沉降的既有建筑可采取锚杆静压桩、高压旋喷桩等进行地基处理,定期检测则需对建筑物及地基设立沉降观测点以及深层位移监测点,开展不少于六个月的跟踪观测工作以保证施工后的沉降速度符合规范规定。

3.5 综合治理与施工组织措施

岩溶区的工程施工常常需要多方面措施联合应用,一种技术方法很难解决所有的问题,综合治理的原则是“先探后治、治理相结合、动态布控”,即施工之前要做好详细的地质调查,综合利用物探、钻探、孔内三维扫描等多种途径查明岩溶情况,在施工过程中应该结合揭露出来的地质状况及时调整处理策略。在实施高速公路建设之前,应该首先把岩溶与土洞的位置探测明白,再对具体情况采取对应的防护办法^[4]。施工部署时应采取“由外部到内部、由深层到浅层”的顺序,优先实施帷幕注浆及外围治理,

之后再做内部部分的工作,构建起“防-治-排”三位一体的整体防护架构。同时要建设岩溶塌陷综合数据库,及时更新监测数据,完善“群专结合”立体化的监测体系。

4 结语

岩溶区工程地质问题种类繁多,原因繁复,其中岩溶塌陷、溶洞空洞、地基不均匀沉降、地下水流失突水,尤其是溶洞的隐蔽性、不确定性等问题共同构成岩溶区工程建设的主要风险。了解掌握岩溶区工程地质问题分布特点、发育情况,明晰不同类型存在的原因,是制定相应的治理对策的先决条件,在地基加固上采用强夯、高压旋喷注浆、桩基穿过等地基加固方法,在溶洞防治上运用充填法、灌注法、膜袋注浆法、梁板跨越法等措施,在防渗排水稳定控制上采取围封阻隔、灌注封堵、截排疏导并举的方式。岩溶灾害发生的复杂性需要我们采取综合治理措施,遵循“先探后治、治探结合、动态设计”的方针。以后随着对

岩溶区地勘技术水平以及智能化监测仪器的应用,岩溶地区工程建设风险防护水平也会随之提高。

【参考文献】

- [1]鄢略剑.岩溶地区岩土工程勘察及地基处理措施[J].西部探矿工程,2025,37(1):35-38.
- [2]付思博.岩溶地区岩土工程勘察施工技术分析[J].中华建设,2025(9):129-131.
- [3]李来春.岩溶地区工程地质勘察关键技术[J].建材发展导向,2026,24(1):109-111.
- [4]夏涵.岩溶地区地质条件特征及地基基础评价[J].石材,2026(4):46-48.

作者简介:覃自龙(1988—),男,汉族,湖北省随州市随县洪山镇人,工程师,2010年6月毕业于中国地质大学(武汉)土木工程(工程地质方向),本科学历,现主要从事公路、市政道路相关地质工程勘察类。