

岩溶地区地基处理与基础施工技术研究

陈伍杰 612726199605165114

摘要：我国西南地区岩溶地貌分布广泛，岩溶发育形成的溶洞、溶槽、裂隙等不良地质条件给工程建设带来了地基沉降不均、塌陷失稳等诸多风险，严重威胁工程结构的安全与耐久性。本文结合岩溶地区的地质特性，分析了岩溶地基的主要风险类型，针对性梳理了换填法、灌浆法、桩基础法等常见地基处理技术的适用场景与技术要点，探讨了基础施工过程中的质量控制要点，旨在为岩溶地区工程建设的地基处理与基础施工提供技术参考，降低岩溶地质带来的工程风险。

关键词：岩溶地区；地基处理；基础施工；质量控制

一、岩溶地区地质特征与地基风险分析

岩溶是可溶性岩石在地下水长期溶蚀作用下形成的地貌形态，在我国云贵高原、两广丘陵等南方地区分布最为集中。岩溶发育过程中会形成大小不一的溶洞、溶沟、溶槽、石芽以及隐伏裂隙，地质结构呈现出明显的不均匀性：一方面，岩溶区域基岩面起伏落差大，同一建筑场地内可能同时存在完整基岩和埋深数十米的溶洞，地基承载力差异可达数倍；另一方面，多数隐伏溶洞被黏土、碎石等填充物充填，填充物的压实度不足，长期受地下水冲刷作用会逐步被淘蚀，形成空洞进而引发地基塌陷。

岩溶地基对工程建设的风险主要体现在三个方面：第一是承载力不足，岩溶裂隙与填充土层的压缩模量远低于完整基岩，在上部结构荷载作用下容易产生较大的沉降变形，引发墙体开裂、建筑倾斜等问题；第二是塌陷风险，埋藏较浅的溶洞顶板受荷载作用后容易发生断裂失稳，若施工过程中未探明隐伏溶洞，极易引发施工期地面塌陷，造成人员设备损伤；第三是渗漏与潜蚀风险，岩溶区域地下水连通性好，施工过程中抽水或者地下水水位波动会带动填充物持续流失，逐步扩大溶洞范围，长期威胁地基稳定性。

二、岩溶地区常见地基处理技术

2.1 换填垫层法

换填垫层法适用于溶洞埋深较浅（一般埋深小于 3m）、溶洞体积不大的浅层岩溶地基处理，是工程中最为简便经济的处理方式。具体施工流程为：首先通

过钻探探明浅层溶洞的范围与埋深，将溶洞内部的软弱填充物全部挖除，然后选用强度高、压缩性低、稳定性好的材料分层回填压实，常用回填材料包括级配碎石、灰土、矿渣等。对于换填后的垫层，需要通过压实度检测确保其满足承载力要求，换填完成后垫层可以直接作为浅基础的持力层，有效扩散上部结构荷载，降低沉降变形。该方法的优势是施工工艺简单、成本较低，不需要大型机械设备，缺点是仅适用于浅层小规模岩溶，若溶洞埋深过大，挖填工程量会大幅提升，经济性显著下降。

2.2 灌浆加固法

灌浆加固法是处理隐伏岩溶地基最常用的技术之一，适用于埋深较大、不宜开挖换填的岩溶区域，其核心原理是将配置好的水泥浆液或者水泥-水玻璃双液浆通过钻孔注入岩溶溶洞与裂隙之中，浆液凝固后将破碎岩体和填充物胶结为整体，同时填充溶洞空洞，提高地基的整体承载力与抗渗性。根据岩溶发育程度的不同，灌浆法可以分为全充填灌浆和压力注浆两种：对于中小规模的填充型溶洞，采用全充填灌浆可以直接填满空洞，形成稳定的地基持力层；对于开口型溶洞或者连通性较好的裂隙，采用压力注浆可以将浆液挤入填充土层的孔隙，提高土层的密实度。

灌浆施工过程中需要控制好注浆压力与注浆量，一般来说，注浆压力控制在 $0.3\sim 0.5\text{MPa}$ 即可，压力过大容易引发地面劈裂，导致浆液流失；注浆量以钻孔吸浆量达到设计标准、孔口压力稳定后即可停止注浆。该技术不需要开挖，对场地原有地形破坏小，适用于各种规模的隐伏岩溶，成本相较于桩基础更低，因此在道路工程、房屋建筑中都得到了广泛应用。

2.3 桩基础处理技术

对于存在大型溶洞、地基荷载要求较高的高层建筑或者桥梁工程，通常采用桩基础跨越岩溶区域，将桩端放置在下部完整的不可溶基岩上，依靠桩身的侧摩阻力和端承载力传递上部荷载，从根本上规避上部岩溶区域带来的不稳定风险。岩溶地区常用的桩基础包括预制桩和灌注桩两类：预制桩施工速度快，桩身质量容易控制，但遇到石芽起伏较大的基岩面时，容易发生桩身倾斜或者断桩问题，因此仅适用于岩溶裂隙发育均匀、基岩埋深不大的场地。

灌注桩是岩溶地区桩基础的首选类型，其中旋挖灌注桩和冲击灌注桩应用最为广泛。冲击灌注桩适用于存在大块孤石和岩面起伏大的岩溶场地，可以通过冲击破碎挤实溶洞填充物，桩端直接嵌入完整基岩，承载力满足高荷载要求；但在施工过程中容易出现漏浆、塌孔问题，需要提前采取回填黏土、片石堵漏等措施处理。对于多层串珠状溶洞，施工时需要遵循先小后大、逐洞处理的原则，每穿

越一个溶洞就进行一次堵漏加固，确保孔壁稳定后再继续钻进。

三、岩溶地区基础施工的质量控制要点

岩溶地区地质条件复杂，隐伏溶洞往往难以完全探明，因此施工过程中需要加强动态质量控制，及时调整施工方案。首先，施工前必须做好详细的地质勘察，除了常规的钻探勘察外，对于复杂场地可以结合物探技术（比如高密度电法、地质雷达）扩大探测范围，提高隐伏溶洞的探明率，避免因勘察疏漏留下安全隐患。勘察过程中钻孔间距不宜过大，对于建筑工程，关键部位的钻孔间距应控制在10m以内，确保准确掌握每个建筑区块的岩溶发育情况。

其次，施工过程中要加强原位检测，对于换填垫层法，每一层回填完成后都需要检测压实系数和承载力，只有满足设计要求后才能进行下一层回填；对于灌浆加固法，施工完成后需要通过钻芯取样检测浆液的充填饱满度和固结体强度，对于充填不饱满的区域需要进行补灌；对于桩基础，需要通过低应变检测或者超声波透射法检测桩身完整性，确保桩身没有断桩、离析等缺陷，端承桩还需要进行承载力检测，确认桩端确实嵌入完整基岩。

最后，施工过程中要做好地下水控制，岩溶区域地下水连通性强，水位波动会对地基稳定性产生较大影响，施工期间若需要降水，应当控制降水速度和降水范围，避免因过度降水引发周边地面沉降；对于存在地下水流动的溶洞，处理地基时应当做好排水导流，避免地下水长期潜蚀淘刷地基，长期运行过程中还应当定期监测地基沉降，及时发现异常变形并采取加固措施。

四、结语

岩溶地区的地基处理与基础施工是工程建设中的难点问题，处理方案的选择需要结合岩溶发育规模、埋深、工程荷载要求以及场地条件综合确定：对于浅层小规模岩溶优先选用换填垫层法，对于中深层隐伏岩溶可以选用灌浆加固法，对于高荷载要求的大型工程则优先采用桩基础跨越岩溶区域。施工过程中需要强化地质勘察和过程质量控制，根据实际地质条件动态调整施工方案，才能有效保障岩溶地区地基的稳定性，降低工程建设风险。

参考文献

- [1] 江杰, 马少坤, 韦昌富. 岩溶地区地基处理技术研究进展[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S1): 102-106.
- [2] 张嘎, 张建民. 岩溶地基稳定性评价与加固技术[M]. 北京: 中

国建筑工业出版社, 2020.

[3] 李建林, 王乐华. 岩溶地区工程地质问题与防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(08): 1652-1661.