

# 浅谈桥梁桩基施工中的溶洞地基处理技术

文 / 李 刚 四川公路桥梁建设集团有限公司公路三分公司

**摘要：**随着桥梁建设规模的扩大，溶洞地基的处理显得尤为关键，为了解决这一问题，近年来许多新的地基处理技术不断涌现，各类加固方案被提出并逐渐应用于实际施工中。然而，溶洞的地质特性差异，往往使得地基加固效果难以标准化。基于此，本文探讨了桥梁桩基施工中溶洞地基处理技术的作用，然后分析当前存在的问题，并提出解决策略，希望可以确保桥梁建设质量。

**关键词：**桥梁桩基；溶洞地基；施工技术；地质加固

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.12.052

## 引言

桩基作为桥梁工程中最常见的基础形式，其施工质量直接影响到桥梁的稳定性。在溶洞地基环境中，桩基的施工面临着极大的挑战。溶洞是由地下水流或其他因素形成的空洞状结构，通常存在于岩溶地区。由于其存在的不可预见性，溶洞的存在会使得桩基难以达到预期的承载力，进而影响桥梁的整体安全性。因此，如何有效地处理溶洞地基，成为桥梁桩基施工中亟待解决的问题。

### 一、桥梁桩基施工中溶洞地基处理技术的作用

对于桥梁建设而言，桩基承担着支撑桥梁重量的作用，还要应对交通荷载、气候变化等外界因素的冲击。溶洞地基的存在往往导致桩基承载力不足、桩身倾斜、沉降异常等问题，若不进行有效处理，将会严重威胁桥梁的结构安全。因此，在桥梁桩基施工中，采取科学合理的溶洞地基处理措施至关重要。在施工过程中，溶洞可能因施工震动、地下水流动等因素发生变化，进一步加剧桩基施工的不稳定性<sup>[1]</sup>。这种情况下，合理的地基处理技术可以有效遏制溶洞的扩展或崩塌，确保桩基施工的稳定。常见的处理方法包括地基加固注浆、机械压实等技术，能够加强溶洞区域的土体强度，提高桩基与地基的黏结力，从而增加桩基的承载力和稳定性。此外，采用合适的桩基设计方案，根据溶洞分布情况对桩基进行优化布置，能够有效避免桩基因溶洞带来的不均匀沉降，保证桥梁的稳定。溶洞地基的有效处理，有助于提高桩基的稳定性，降低工程成本。在溶洞地基处理过程中，采用科学合理的技术可以减少不必要的反复施工和工程修复，从而节省成本。

### 二、当前在桥梁桩基施工中溶洞地基处理技术存在的问题

溶洞的大小、形态、分布等因素常常无法在初期勘测中得出准确的结论，导致在实际施工时出现无法预见的地基变化。桩基设计通常基于初步勘探数据进行，而一旦施工过程中发现溶洞的实际情况与勘探数据不符，就需要调整施工方案，这不仅增加了施工难度，还可能导致工期的延长和成本的提高。溶洞地基的处理方法尚不完全适用于所有的地质环境，不同地区的溶洞特征差异较大，导致相同的处理技术在不同工程中效果差异较大。常见的处理方法如注浆加固、机械压实等，在一些

特殊地质条件下可能未能取得预期的效果。例如，注浆加固技术虽然可以有效提高土体的密实度，但在溶洞较大或者分布较为复杂的区域，注浆液可能无法完全渗透至溶洞内部，从而造成加固效果的不均匀。而对于溶洞较为严重的地区，单一的加固方法可能不足以确保桩基的稳定性，往往需要多种技术手段结合应用，增加了施工的复杂性和不确定性<sup>[2]</sup>。此外，施工人员的技术水平和经验也影响着溶洞地基处理的效果。溶洞地基的处理需要施工人员具有较高的专业技能和丰富的经验，然而目前许多项目的施工人员缺乏足够的培训和实践经验。在一些项目中，施工人员采用不当的施工方法，导致处理效果不佳，甚至引发安全隐患。这种技术水平的差距直接影响了溶洞地基处理的整体效果，增加了工程的风险。施工过程中，溶洞的不断变化也是一个难以预测的因素。溶洞的形成不仅受到地下水流动、溶解作用的影响，还可能与人为因素有关。施工过程中，溶洞的形态和分布可能发生变化，甚至可能发生新的溶洞的形成。这些变化往往没有提前预见到，导致已经处理过的地基在后期出现新的问题，需要重新处理，这不仅延误了施工进度，还可能带来新的工程隐患。

### 三、桥梁桩基施工中溶洞地基处理技术的应用策略

#### （一）加强地质勘察，提高溶洞的发现率

溶洞通常隐藏于地下，传统的地质勘察方法可能无法准确探测到其真实存在，因此，采用现代化、精细化的勘察手段，对溶洞进行精确定位，是确保施工过程中能够有效应对地基问题的基础<sup>[3]</sup>。在施工前，针对可能存在溶洞的区域，采用先进的探测技术进行详细的地质勘查。常规的钻探法虽然可以得到一定的地下土层信息，但对于溶洞这一特殊地质结构，无法提供准确的检测结果，因此，必须结合现代技术手段，例如地质雷达探测技术。地质雷达可以穿透地表并检测到地下溶洞，通过反射波的分析，可以精确定位溶洞的分布情况。这一技术在一些复杂地质环境中的应用，能够提供比传统方法更加全面和直观的数据，帮助工程师提前识别潜在的溶洞区域，为后续的处理提供科学依据。结合钻孔取样与地质雷达探测技术的综合使用，进一步提高溶洞探测的准确性。通过钻探取样和地质雷达探测相结合，能够多角度、全方位地了解地下土层结构，尤其是溶洞的具体分布情况。钻探可以提供较为详细的土质和水文信息，

而地质雷达则可以通过电磁波穿透地下进行实时监测，在遇到溶洞等空洞结构时，探测波会发生反射，反射波的变化能够帮助判断溶洞的具体位置和规模。两者的结合有效提升了溶洞探测的精度，确保了施工阶段能够更好地应对溶洞问题。

### (二) 采用复合加固技术，确保加固效果

施工单位通过调整桩基位置和设备安装，进行精准地检测与处理。这些步骤包括对桩基的垂直度和施工环境的检查，确保桩基施工在正确位置进行，见图 1。复合加固技术通过结合多种加固手段，可以有效提升地基的稳定性和桩基的承载力，确保溶洞区域的加固效果达到最佳状态。在具体实施过程中，要进行详细的地质勘察，掌握溶洞的分布、规模以及地质特征。只有在准确了解了溶洞的具体情况之后，才能选择适合的加固手段进行

有效组合。一般而言，复合加固技术常见的组合方式包括注浆加固与桩基加固技术的结合。注浆加固能够有效填充溶洞内部的空隙，增强周围土层的密实度，增加地基的承载能力。注浆材料必须根据土质、溶洞大小以及水文条件等因素，选择合适的材料，如水泥浆、树脂浆等，不同的材料具有不同的渗透性和强度，能够满足不同地质条件下的加固需求。注浆时要确保浆液能够充分渗透至溶洞内部，并通过不断的压力注入，使其与周围土体结合牢固，从而有效加固溶洞区域的地基。在复合加固技术的实施中，桩基加固是另一项重要的手段。桩基加固主要通过改变桩的设计方案，增加桩的深度和直径，确保桩基能够穿越溶洞区域，达到稳定的承载层。在桩基的布置上，要尽量避免桩基受到溶洞的影响，设计时应考虑溶洞的分布情况，对桩基的数量和位置进行优化。

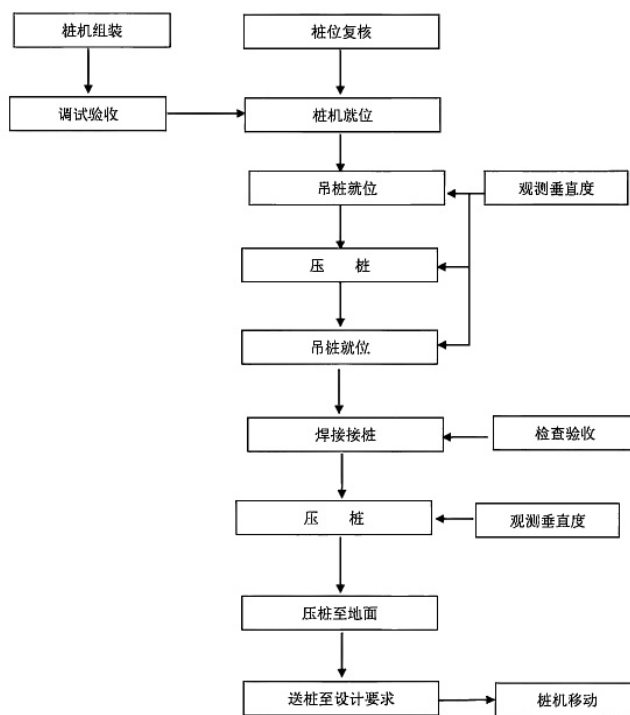


图 1：地基处理流程图

### (三) 加强施工人员培训，提升其工作能力

培训应从基础知识入手，帮助施工人员掌握地质勘察的基本原理与技术，包括如何识别不同类型的溶洞、如何分析土壤特性和溶洞的分布模式。这种基础培训有助于施工人员在实际操作中对潜在的地质风险进行预判，提前采取相应的处理措施，避免施工过程中因判断失误导致的安全事故和经济损失。在基础知识培训的基础上，还需要加强对先进勘察技术的学习与应用培训。溶洞地基的复杂性要求施工人员熟悉并掌握现代化的地质勘察技术，如地质雷达、声波探测、静力触探等，这些技术能够更准确地探测到溶洞的存在以及其规模。施工人员要学会使用这些设备并理解其原理，掌握如何根据探测结果判断溶洞的影响范围和严重性，从而为后续的加固处理提供准确的依据。培训内容不仅仅是如何操作仪器，

还应包括如何分析探测数据，确保施工人员能够灵活运用现代勘察技术获取所需信息。溶洞地基的处理涉及多种加固技术，如注浆加固、桩基加固、土体改良等，每种技术都有其独特的操作方法和注意事项<sup>[4]</sup>。施工人员需要对这些加固方法的实施过程进行详细了解，掌握每一项技术的施工步骤、技术要求及其适用条件。尤其是在溶洞分布复杂、规模不一的情况下，施工人员要能够根据实际情况灵活选择和调整加固方案。这要求其要理解每种技术的理论背景，能在实践中根据地质条件和工程需求，做出最合适的技术选择和施工方案调整。

### (四) 采取针对性的施工方法，以确保地基的稳定性

施工单位通过调整桩基位置和设备安装，进行精准地检测与处理。这些步骤包括对桩基的垂直度和施工环

境的检查，确保桩基施工在正确位置进行，见图 1。对于小型溶洞，可以注入高强度的浆液填充溶洞，强化周围土体的承载能力，改善土体结构的稳定性。这种方法对于小型溶洞处理有效，可以快速形成一个坚实的基础。然而，对于大型溶洞或者分布较广的溶洞，单一的注浆方法可能无法达到理想的加固效果。这时，施工方案需要加入其他加固手段，如桩基加固技术。通过设计特殊的桩基，确保桩体能够穿透溶洞区域并牢固打入到未受影响的土层中，从而确保桥梁结构的稳定性。在桩基设计上，针对溶洞的大小和分布，增大桩基的直径和深度，以确保桩基能够承载更多的荷载并适应不均匀沉降的要求。在优化施工方案时，针对不同的施工阶段，也需要采取灵活的施工方法。例如，在溶洞较为集中的区域，施工过程中需要加强实时监测，确保施工人员能够随时掌握地下状况的变化。采用动态监测设备，结合地质雷

达和其他探测手段，及时发现新的溶洞或溶洞扩展的情况，避免因地质变化造成的施工问题。此外，施工过程中要注意分阶段实施，不同的施工阶段需要采取不同的施工方法。例如，在地基处理阶段，可以采用注浆、桩基加固和土体稳定性改善等方法相结合的手段，确保地基的整体稳定。而在桩基施工阶段，则要特别注意溶洞周围土层的变化情况，在遇到溶洞或软弱土层时，及时调整施工工艺，确保桩基能够顺利完成且承载力满足要求。针对溶洞地基的处理，施工方法的选择还需要考虑工程的实际情况，综合考虑施工成本和工期。为了降低施工成本和提高施工效率，施工单位可以考虑采用现代化的施工设备和技术，如自动化注浆系统和定向钻孔技术，避免传统施工方法中可能存在的人工操作误差和施工周期过长的问題。见表 1。

表 1：施工流程图

施工阶段	主要任务	施工方法	注意事项
地基处理阶段	确保地基整体稳定性	注浆加固法 桩基加固 土体稳定性改善	采用注浆、桩基加固与土体稳定性改善方法相结合。加强实时监测，及时发现新的溶洞或溶洞扩展情况。
桩基施工阶段	处理溶洞及软弱土层问题	调整施工工艺 采用定向钻孔技术	注意溶洞周围土层的变化情况。在遇到溶洞或软弱土层时，及时调整施工工艺，确保桩基承载力满足要求。
施工设备与技术	降低施工成本与提高施工效率	自动化注浆系统 定向钻孔技术	采用现代化施工设备，减少人工操作误差。避免传统施工方法中的工期过长问题。
实时监测	监测地下状况的变化	动态监测设备 地质雷达与其他探测手段	强化动态监测，确保施工人员随时掌握地下变化。及时发现溶洞扩展，避免地质变化引发施工问题。

**(五) 提升技术研发，进行设备更新**

科研人员和技术专家应针对不同类型的溶洞，开发出更加高效且经济的处理技术。例如，当前广泛应用的注浆加固技术虽然在处理小型溶洞时效果显著，但在处理大规模溶洞或者复杂溶洞结构时可能存在一定的局限性，因此，研发新的注浆材料，提升加固效果，就显得尤为重要。技术研发应与实际施工需求紧密结合，研究如何根据不同溶洞的大小、形态和分布特点，制定更加精准的加固方案。随着勘察技术的不断进步，新型探测设备和施工机械的应用日益重要<sup>[5]</sup>。提升技术研发的另一重要方向是设备的创新。在溶洞地基处理过程中，传统的探测方法和施工机械往往无法满足高效、精准的施工需求，因此必须进行设备更新。在技术研发和设备更新过程中，施工单位还应加强与科研机构 and 高等院校的合作，共同进行设备研发。通过产学研合作，能够将理论研究和实践应用紧密结合，研发出适应现场施工要求的新技术、新设备。同时，科研机构应根据实际需求开展应用技术研究，探索新型材料的使用。例如，在溶洞地基的加固过程中，开发出新型、高强度的注浆材料，可以提高浆液的渗透性，从而更好地填充溶洞并增强周围土层的承载能力。这些新材料的研发需要结合不同地区的土质特性以及溶洞的分布规律，进行有针对性的创新。在实施设备

更新的过程中，施工单位不仅要引进先进的技术，还要注重设备的智能化。现代化的施工设备能够在施工过程中实时监测土体的变化，及时反馈施工状态，帮助施工人员在第一时间发现潜在问题。

**结语**

在桥梁桩基施工过程中，溶洞地基的处理是保障施工质量的关键环节。然而，溶洞地基处理技术面临许多挑战，需要行业内持续的技术研发。未来，随着技术的不断进步，解决溶洞地基问题将成为桥梁建设领域的重要问题，为提升基础设施的质量作出积极贡献，促进行业发展。

**参考文献**

[1] 周雷靖, 余国兆, 林伟斌. 电厂溶洞地基处理关键技术和疑难问题分析 [J]. 南方能源建设, 2022, 9 (S1): 69-75.  
 [2] 钟志彬. 岩溶地区地基处理及桩基施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2022, (09): 52-54.  
 [3] 张晓雯. 桥梁溶洞地段处理技术研究 [J]. 运输经理世界, 2021, (32): 94-96.  
 [4] 张贝贝, 伍廷亮, 王玉松, 晋明超. 贵阳某隐伏横向溶洞地基处理的稳定性分析 [J]. 工业建筑, 2022, 52 (04): 133-139.  
 [5] 俞靖端, 胡庆. 压力注浆加固溶洞地基在市政工程中的应用 [J]. 特种结构, 2021, 38 (01): 85-89.