

水利工程隧道穿越断层破碎带的加固技术及效果分析

原俊峰

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要: 水利工程隧道穿越断层破碎带时面临诸多挑战,断层破碎带具有地质构造复杂、岩体破碎、含水量高等特点,易引发突水突泥、塌方等地质灾害。注浆加固技术作为有效手段,通过提高围岩强度和稳定性来保障施工安全。本文深入探讨了注浆加固技术的原理、材料选择、施工工艺及效果评估,并结合分析了其应用效果。研究表明,注浆加固技术能显著改善围岩性能,降低地质灾害风险,为水利工程隧道穿越断层破碎带提供有力支持。

关键词: 水利工程隧道;断层破碎带;注浆加固技术;效果分析

引言

在水利工程建设中,隧道工程是常见的建设形式之一,用于输水、排水、发电等多种目的。然而,在隧道施工过程中,往往会遇到复杂的地质条件,其中断层破碎带是一种极具挑战性的不良地质类型。断层破碎带是地壳运动过程中,由于岩石受力超过其强度极限而发生破裂,两侧岩块沿破裂面发生显著相对位移所形成的构造带。它具有地质构造复杂、岩体破碎、含水量高等特点,这些特性给隧道施工带来了极大的困难,如突水突泥、塌方冒顶等地质灾害频发,严重威胁着工程建设的顺利进行和施工人员的生命财产安全。因此,研究水利工程隧道穿越断层破碎带的加固技术及其效果具有重要意义。

1 断层破碎带对隧道施工的影响

1.1 围岩强度降低

断层破碎带中的岩体由于受到构造运动的影响,节理裂隙发育,完整性差。在微观层面,岩石内部的晶体结构遭到破坏,颗粒之间的胶结作用减弱,导致围岩的强度和承载能力显著降低。在隧道开挖过程中,这种低强度的围岩难以承受开挖引起的应力重分布。例如,当隧道开挖后,原本处于平衡状态的岩体应力被打破,围岩会向开挖空间发生变形,而低强度的破碎岩体无法抵抗这种变形,容易发生片帮、冒顶等现象,严重影响施工安全和进度。

1.2 渗水与软化

断层破碎带往往富含地下水,高含水量使得岩体容易发生软化现象。水分子会进入岩石的孔隙和裂隙中,与岩石中的矿物成分发生物理和化学作用。物理上,水会占据岩石孔隙空间,降低岩石的密实度;化学上,水会与一些矿物发生水解、溶解等反应,破坏岩石的矿物结构。这种软化作用使得岩体的抗剪和抗拉强度进一步

降低,增加了岩体的变形和流动性。在隧道施工中,渗水还可能导致泥化现象,形成泥浆^[1]。泥浆的存在不仅增加了施工的难度,还可能导致施工设备的损坏,如泥浆堵塞排水管道、影响挖掘机的正常作业等。

1.3 应力重新分布

隧道开挖会打破原有岩体的应力平衡状态,导致应力重新分布。在断层破碎带中,由于岩体的不均匀性和各向异性,应力重新分布更加复杂和难以预测。不同部位的岩体由于其岩性、结构和受力历史的不同,对应力变化的响应也不同。这种复杂的应力状态可能导致围岩产生较大的变形和位移,甚至引发地质灾害。例如,在某些部位可能会出现应力集中现象,当应力超过岩体的强度极限时,就会引发岩爆、塌方等灾害。

2 注浆加固技术原理及材料选择

2.1 注浆加固技术原理

注浆加固技术是通过向断层破碎带中的岩体注入具有胶凝性的浆液,填充岩体中的裂隙和孔隙,使岩体胶结成一个整体,从而提高岩体的强度和稳定性。其作用机理主要包括以下几个方面:

2.1.1 填充作用:

浆液能够填充岩体中的裂隙和孔隙,减少岩体的渗透性。在断层破碎带中,裂隙和孔隙是地下水流动的主要通道,通过注浆填充这些通道,可以阻止地下水的流动,降低渗水对岩体的软化作用。例如,对于一些宽度较小的裂隙,浆液可以直接填充其中,形成一层隔水层,有效地阻止地下水的渗透。

2.1.2 胶结作用:

浆液在岩体中固化后,能够将松散的岩体胶结成一个整体。浆液的胶凝材料会与岩体颗粒发生化学反应,形成具有一定强度的胶结物,将岩体颗粒粘结在一起。这种胶结作用可以显著提高岩体的强度和抗变形能力,

使岩体能够承受更大的应力。

2.1.3 挤密作用:

在注浆过程中,浆液对岩体产生一定的压力,使岩体中的颗粒重新排列,降低岩体的孔隙比,提高岩体的密实度。挤密作用可以使岩体更加紧密,减少岩体的变形和位移,提高岩体的稳定性。

2.2 注浆材料选择

注浆材料的选择对于注浆加固效果至关重要。常用的注浆材料包括水泥基浆液、化学浆液等。

2.2.1 水泥基浆液:

水泥基浆液是以水泥为主要成分,掺入适量的水和其他外加剂配制而成的浆液。它具有来源广泛、成本低廉、无毒无害等优点。通过调整水泥的品种、水灰比以及外加剂的种类和掺量,可以控制水泥基浆液的凝结时间、流动性、结石强度等性能。普通硅酸盐水泥是常用的基材,但在一些特殊情况下,可以掺入硫铝酸盐水泥进行增强。硫铝酸盐水泥具有快硬、早强等特点,可以提高浆液的早期强度,缩短注浆加固的周期^[2]。可以添加高性能纤维素改善抗水冲散性,使浆液在地下水环境中不易被冲散,保证注浆效果。采用减水剂提升浆液流动性,使浆液能够更好地填充岩体中的裂隙和孔隙。掺入消泡剂消除气泡,避免气泡在浆液固化后形成空洞,影响注浆加固质量。

2.2.2 化学浆液:

化学浆液是通过化学反应形成固体的浆液,如聚氨酯类、环氧树脂类等。化学浆液具有凝结时间短、结石强度高、抗渗性好等优点,适用于一些对注浆效果要求较高的场合。然而,化学浆液的成本较高,且部分化学浆液具有毒性,对环境 and 人体健康可能产生一定的影响。例如,聚氨酯类浆液在固化过程中会释放出一些有害气体,需要采取相应的防护措施。

在实际工程中,应根据断层破碎带的地质条件、施工要求以及注浆材料的性能特点,选择合适的注浆材料。

3 注浆加固施工工艺

3.1 注浆前准备

3.1.1 地质勘探:

在施工前,应对隧道穿越的断层破碎带进行详细的地质勘探,了解岩体的岩性、结构、含水情况、裂隙发育程度等地质信息。可以采用地质钻探、地球物理勘探等方法进行勘探。地质钻探可以直接获取岩芯样本,分析岩体的岩性和结构;地球物理勘探可以利用地震波、电磁波等方法探测岩体的内部结构和含水情况。这些地质信息有助于确定注浆加固的范围、深度和注浆参数等。

3.1.2 注浆孔布置:

根据地质勘探结果和隧道设计要求,合理布置注浆孔。注浆孔的位置、间距、深度等参数应根据岩体的裂隙发育情况、注浆扩散半径等因素确定。一般来说,注浆孔应布置在断层破碎带的核心区域,以确保注浆效果。注浆孔的间距应根据岩体的破碎程度和注浆材料的扩散能力来确定,间距过大可能导致注浆盲区,间距过小则会增加施工成本。

3.1.3 注浆设备准备:

准备好注浆所需的设备,如注浆泵、搅拌机、注浆管等。注浆泵应具有足够的压力和流量,以满足注浆施工的要求。注浆泵的压力应根据注浆深度和岩体的阻力来确定,流量应保证浆液能够连续、稳定地注入岩体中。搅拌机应能够将注浆材料和水充分搅拌均匀,确保浆液的性能稳定。注浆管应具有良好的耐压性和耐腐蚀性,以确保注浆过程的顺利进行。

3.2 注浆施工

制浆:按照设计的浆液配方,将注浆材料和水按比例加入搅拌机中,搅拌均匀后制成浆液。在制浆过程中,应严格控制浆液的稠度、凝结时间等性能参数。浆液的稠度会影响浆液的流动性和扩散范围,凝结时间应根据施工要求进行调整,确保浆液在注入岩体后能够及时固化。注浆:将制好的浆液通过注浆泵和注浆管注入到断层破碎带中的岩体中。注浆过程中,应控制注浆压力和注浆速度,避免注浆压力过大导致岩体破坏或注浆速度过快导致浆液流失。同时,应密切观察注浆过程中的异常情况,如串浆、漏浆等,并及时采取措施进行处理^[3]。串浆是指浆液从一个注浆孔流入到另一个注浆孔的现象,可能是由于岩体中的裂隙连通导致的,此时应及时调整注浆参数或堵塞串浆孔。注浆结束与封孔:当注浆压力达到设计值或注浆量达到设计值时,可以停止注浆。注浆结束后,应及时对注浆孔进行封孔处理,防止浆液流失和地下水进入隧道。封孔可以采用水泥砂浆等材料进行封堵,确保封孔质量。

3.3 注浆后监测与评估

监测:注浆加固施工完成后,应对隧道围岩进行监测,包括位移监测、应力监测、渗流监测等。位移监测可以采用全站仪、收敛计等仪器,监测围岩的变形情况;应力监测可以采用应力计等设备,监测围岩的应力变化;渗流监测可以采用渗压计等设备,监测地下水的渗流情况。通过监测数据,可以了解注浆加固效果以及围岩的稳定性情况。(2)评估:根据监测结果和隧道设计要求,对注浆加固效果进行评估。如果注浆加固效果

不理想,应及时采取措施进行补救,如增加注浆孔、调整注浆参数等。评估指标可以包括围岩的强度增长、变形控制情况、渗流控制情况等。

4 注浆加固效果分析

从理论角度来看,注浆加固技术通过填充岩体裂隙、胶结松散岩体、挤密岩体颗粒等方式,能够显著提高岩体的强度和稳定性。具体来说,注浆加固后,岩体的抗剪强度、抗拉强度、抗压强度等力学性能指标都会得到不同程度的提高。同时,注浆加固还能够降低岩体的渗透性,减少地下水的渗流对岩体的软化作用,进一步提高岩体的稳定性。可以通过建立力学模型和数学模型,对注浆加固前后的岩体强度和稳定性进行理论分析和计算。

5 注浆加固技术面临的挑战与对策

5.1 面临的挑战

地质条件复杂性:断层破碎带的地质条件往往非常复杂,岩体的岩性、结构、含水情况等因素都可能对注浆加固效果产生影响。例如,不同岩性的岩体对浆液的吸收和胶结能力不同,复杂的结构可能导致浆液难以均匀填充,高含水量会增加浆液的稀释和流失。因此,在实际工程中,很难准确地预测和控制注浆加固效果。注浆材料性能局限性:虽然注浆材料的种类繁多,但每种注浆材料都有其性能局限性。例如,水泥基浆液的凝结时间较长,难以满足一些对注浆速度要求较高的场合;化学浆液的成本较高,且部分化学浆液具有毒性等。此外,一些注浆材料在低温或高温环境下的性能也会受到影响,限制了其应用范围。施工工艺难度:注浆加固施工工艺相对复杂,需要专业的设备和技术人员进行操作。在施工过程中,还需要严格控制注浆压力、注浆速度等参数,以确保注浆效果。此外,注浆加固施工还可能受到地下水、地质构造等因素的影响,增加了施工工艺的难度^[4]。例如,地下水的流动可能会导致浆液被冲走,地质构造的复杂性可能会使注浆孔出现塌孔等问题。

5.2 对策

加强地质勘探与监测:在施工前,应加强对断层破碎带的地质勘探工作,尽可能准确地了解岩体的地质信息。可以采用多种勘探方法相结合,提高勘探的准确

性。在施工过程中,应加强对围岩的监测工作,及时发现和处理异常情况,确保注浆加固施工的顺利进行。例如,通过实时监测围岩的位移和应力变化,及时调整注浆参数。研发新型注浆材料:针对注浆材料的性能局限性,应加大研发力度,开发新型注浆材料。例如,可以研发具有快速凝结、高强度、无毒无害等特点的注浆材料,以满足不同工程的需求。同时,可以研究注浆材料的复合使用,发挥不同材料的优势,提高注浆加固效果。优化施工工艺:通过优化注浆孔布置、注浆材料选择、注浆参数控制等方面的施工工艺,提高注浆加固效果。例如,根据岩体的裂隙发育情况和注浆扩散半径,合理调整注浆孔的间距和深度;根据施工要求选择合适的注浆材料 and 外加剂;通过试验确定最佳的注浆压力和注浆速度。同时,还可以采用先进的施工技术和设备,如智能注浆系统、高压注浆泵等,提高注浆加固施工的效率和质量。

结语

水利工程隧道穿越断层破碎带时面临着诸多挑战,如围岩强度降低、渗水与软化、应力重新分布等。注浆加固技术作为一种有效的加固手段,通过填充岩体裂隙、胶结松散岩体、挤密岩体颗粒等方式,能够显著提高岩体的强度和稳定性,降低地质灾害风险,确保隧道施工的顺利进行。然而,注浆加固技术也面临着地质条件复杂性、注浆材料性能局限性、施工工艺难度等挑战。为了克服这些挑战,应加强地质勘探与监测、研发新型注浆材料、优化施工工艺等方面的工作。通过不断的研究和实践,注浆加固技术将在水利工程隧道穿越断层破碎带中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1]岳波.隧道穿越断层破碎带围岩变形时空特性研究[J/OL].铁道建筑技术,1-5[2025-04-01].
- [2]李慧.隧道穿越富水断层破碎带围岩变形分析及处治措施[J].国防交通工程与技术,2025,23(01):70-74.
- [3]吴新栋.隧道穿越断层破碎带施工技术及其渗流破坏特性研究[J].北方交通,2024,(12):79-82.
- [4]蔡昊良.金口河隧道穿越断层破碎带注浆加固技术实践[J].交通科技与管理,2024,5(16):19-21.