

水电项目工程地质勘察中的地下水渗透与稳定性分析

肖文义

华东勘测设计院（福建）有限公司，福建 福州 350003

[摘要]随着水电作为一种可再生能源在全球范围内的广泛应用，地下水渗透问题在复杂地质条件下的水电项目中愈加显著。地下水流动受基岩的地质特性、地质构造以及地貌变化等多重因素的影响，进而对工程的安全性产生深远影响。针对这一挑战，固结灌浆、帷幕灌浆、化学灌浆与防渗墙等技术已被广泛应用，成为有效应对地下水渗透的主要手段。

[关键词]地质勘察；地下水；渗透；稳定性

DOI: 10.33142/hst.v8i5.16516

中图分类号: P64

文献标识码: A

Analysis of Groundwater Infiltration and Stability in Geological Survey of Hydropower Projects

XIAO Wenyi

HUADONG ENGINEERING (FUJIAN) CORPORATION LIMITED, Fuzhou, Fujian, 350003, China

Abstract: With the widespread application of hydropower as a renewable energy source worldwide, the problem of groundwater infiltration has become increasingly prominent in hydropower projects under complex geological conditions. The flow of groundwater is influenced by multiple factors such as the geological characteristics, geological structures, and changes in topography of the bedrock, which in turn have a profound impact on the safety of the project. In response to this challenge, technologies such as consolidation grouting, curtain grouting, chemical grouting, and anti-seepage walls have been widely applied and become the main means of effectively addressing groundwater infiltration.

Keywords: geological exploration; groundwater; infiltration; stability

引言

在水电项目的建设过程中，地下水渗透可能对坝基、洞室及库岸的稳定性带来潜在风险，从而引发渗漏或围岩不稳等问题。控制渗透并采取有效的防护措施，是保障工程安全的核心。对于项目的顺利进行，深入研究地下水渗透的影响因素及相应的控制技术至关重要。

1 基岩地下水渗透影响因素分析

1.1 地层岩性对基岩地下水渗透的影响

地层岩性对基岩地下水渗透的影响，主要体现在岩石的孔隙度、渗透性以及岩石本身的物理特性上。岩性差异直接决定了地下水的渗透路径与流动特性。例如，砾岩、砂岩等具有较高透水性的岩石，使地下水流动加快，而花岗岩、片麻岩等致密岩石则表现出较低的渗透性。岩层的孔隙度与渗透性成正比关系，孔隙度越高渗透性越强，地下水的流动速度与流动范围也随之增加。砂岩等由颗粒物组成的岩石孔隙空间较大，因此水分通过这些空隙渗透的能力也更强。相比之下，黏土层、页岩等岩性由于较低的孔隙度，其细粒结构限制了水流的通道，表现出较差的渗透性。在基岩中，岩性差异可能导致地下水流动路径的不确定性，从而对坝基及其周围区域的渗漏问题产生影响。此外，岩石的化学性质与抗水性也对地下水渗透特性产生了重要影响。例如，含有黏土矿物的岩层，在吸水膨胀作用下，可能进一步阻碍水流的渗透。因此，岩性分析不仅为理解地下水渗透特性提供了重要途径，也为后续的防渗

处理与水流管理提供了基础数据。

1.2 地质构造对基岩地下水渗透的影响

地质构造对基岩地下水渗透的影响，主要通过裂隙、节理以及断层等结构特征体现，这些构造特征常常改变地下水的流动路径，进而对其渗透性产生重要影响。节理与裂隙是基岩中地下水流动的主要通道，水流通过这些空隙迅速流动，显著提高了渗透性。在层理或节理发育的区域，地下水沿着这些弱面流动，形成集中的水流路径。裂隙或节理的分布模式、密集程度及其相对方向，直接决定了地下水的流动速度与流动路径。断层对地下水渗透的影响同样不容忽视，作为地质构造中的显著特征，断层两侧岩层的位移通常会导致裂缝的形成，进一步促进水流的渗透。特别是活动断层，它们不仅为水流提供了通道，还可能通过断层泥或破碎带改变水流的渗透性影响流速。在某些情况下，断层带和裂隙带可能共同形成地下水集水区，成为水流汇聚的区域，进而对坝基及周围环境施加压力。地质构造对地下水渗透的影响复杂多样，在不同的地质环境中其作用也各不相同。在受强烈构造作用的区域，裂隙与断层对水流的影响尤为显著，水流容易通过这些通道泄漏，甚至加剧局部渗漏问题。因此，在勘察阶段，对地质构造的全面分析尤为重要，必须对构造特征进行深入研究，为后续工程设计与防护措施提供科学依据。

1.3 地貌特征对基岩地下水渗透的影响

地貌特征对基岩地下水渗透的影响，主要通过地形起

伏、坡度变化及河谷等自然因素体现。在高低起伏的地形中,地下水的流动方向和速度常常受地势变化的影响。在山区或丘陵地带,地下水通常沿坡面流动,岩层的破碎带或节理的存在促进了水流的渗透。当这些区域的岩层较松散或裂隙带发育时,地下水的渗透性显著增强,水流可能渗透至更深的地层,甚至形成较大的渗漏区。在河谷及低洼地区,由于积水情况的影响,地下水流动较慢易形成水流汇集带。特别是河流经过的地带,地下水的流动不仅受地形的控制,还受到河水渗透的影响。由于河床与两岸沉积层的差异,地下水常沿基岩与沉积层交界处渗透。水位较高时,水流量和渗透压力增大,从而进一步影响地下水的流动及渗透特性。地貌变化还与风化作用紧密相关,特别是在风化较为严重的区域,岩层表面松散,渗透性增加。在风化带与断裂带的交汇处,地下水的渗透速度与流动范围显著增大,可能导致坝基或隧道等结构区域的渗漏现象变得不均匀。通过分析地貌特征对地下水渗透的影响可以看出,地形的起伏、风化程度及水流积聚等因素不仅改变了水流的方向与速度,还可能在岩层的破碎程度、渗透路径及水压变化等方面产生深远影响。这些特征在水电项目的设计阶段至关重要,它们能有效预测地下水渗透的潜在风险,为后续防护措施的制定提供重要依据。

2 地下水对坝基与库岸稳定性的影响分析

2.1 地下水对坝基渗漏与稳定性的影响

地下水对坝基渗漏与稳定性的影响,主要通过地下水渗透过程作用于坝基的土层或岩层,可能导致坝基的沉降与变形,甚至对坝体结构的安全构成威胁。在水位较高或渗透压力较大的区域,地下水渗透加剧了坝基土层的洗掏现象。水流通过坝基时,可能引发土体的冲刷,局部土壤颗粒流失,从而降低坝基的整体稳定性。随着水流长期渗透,坝基土体的强度逐渐下降,最终可能出现局部沉降或裂缝。渗透压的变化同样对坝基结构产生影响,当坝体两侧存在较大的水位差时,水流从高水位一侧渗透至低水位一侧,渗透压的作用力将对坝基产生压力,进而增加坝体材料的应力。这种不均匀的渗透现象可能引发坝基的沉降不均,甚至导致坝体出现裂缝或发生形变。地下水还可能通过裂隙、节理或断层等弱面渗漏至坝基内部,进一步加剧坝基的不稳定性。在存在节理、裂隙或断层的地质条件下,水流往往沿这些弱面进入地下,增加渗漏量。长时间的渗漏作用将改变坝基所在区域的水文地质环境,从而影响坝基土壤的力学性质,最终可能导致坝基整体失稳。地下水渗透及其带来的影响是多层次、多维度的,不仅可能引起坝基沉降与裂缝,还可能加剧坝体材料的水蚀作用,进而影响水电工程的长期安全运行。基于此,在坝基设计与施工阶段,必须深入分析地下水渗透的特性,采取有效的防渗技术与加固措施,以保障坝基的稳定性和工程的安全性。

2.2 地下水对库岸渗漏与稳定性的影响

地下水对库岸渗漏及稳定性的影响,主要通过其渗透作用改变库岸土层或岩层的水文条件,从而深远地影响库岸的稳定性。在水库蓄水期间,库岸附近的地下水位会受到水位波动的影响,尤其在高位区域,水流可能通过土层的裂缝、孔隙或疏松层渗透,进而形成渗漏通道。这些渗漏现象若未得到有效控制,水流会不断侵蚀库岸土体,导致土壤颗粒流失,最终可能引发局部塌陷或滑坡,严重威胁库岸的稳定性。渗透压的变化同样对库岸稳定性产生显著影响,当库岸两侧存在明显水位差时,地下水的渗透压作用可能导致库岸土体内部应力的集中,进而加剧库岸的潜在不稳定性。特别是在库岸区域存在断层或节理等地质弱面时,地下水易沿这些弱面渗透,从而加剧库岸的侵蚀并增加不稳定的风险。长期的地下水渗透作用会导致库岸土层强度的下降,尤其是在松散土层或风化岩层中,水流的持续作用可能会使土层的抗剪切能力减弱,从而降低库岸的抗滑能力。当库岸上方的土层强度下降时,滑坡、崩塌等地质灾害的发生风险也随之增加,直接影响水库的安全。因此,在水电项目的设计与施工阶段,库岸的水文地质特征应进行全面的勘察与分析,评估地下水对库岸稳定性的潜在影响。针对不同渗透特征和地质条件,宜合理配置防渗与加固措施,其中包括排水系统的优化设计以及加固灌浆等工程技术手段,以切实保障库岸的长期稳定运行。

2.3 地下水对洞室围岩稳定的影响

在地下洞室工程中,地下水的作用不容忽视,其渗流路径的分布、聚集过程的特征以及流动状态的演变,往往直接影响着围岩内部应力场的调整与岩体力学性质的演变。一旦水体沿裂隙、节理或断层构造渗入岩体,原有的地应力平衡便极有可能被打破,随之产生的附加水压力常常导致岩体结构的强度降低、整体稳定性受损。特别是在高地应力条件下,若岩体节理密集、结构松散,由渗流引发的润滑和软化效应便更易使围岩发生破碎、变形甚至局部失稳。不仅如此,围岩稳定性受到的影响也不局限于物理力学层面。当地下水中富含活性离子时,其与岩体之间所发生的化学反应常可引发矿物溶蚀、胶结物解体或结构性膨胀,致使岩体的微观结构发生破坏,从而显著改变其渗透性能与力学响应。尤其在含有膨胀性黏土矿物(如蒙脱石)的地层中,吸水后所产生的体积膨胀,极易造成围岩内部应力重新分布,进而引发剥离、滑移等不稳定现象,使支护系统的有效性大打折扣。更应被重视的是,地下水的变化并非即时显现,其响应往往滞后于地表环境的扰动。渗流路径的演变与水量分布的时空差异,常受到降雨、地形演变、水库运行等多重因素的复合作用,而这些外部变化所诱发的地下水波动,往往会通过渗流系统间接影响围岩的稳定状态。在此背景下,若不将地下水-岩体相互作用纳入系统性的设计思维与施工实践中,工程风险极可能

被低估。为应对上述复杂作用机制,应优先构建集实时监测、数据反馈与动态调控于一体的地下水管理体系。注浆止水、反压支护与科学布设的排水系统等工程技术手段,需因地制宜地加以集成与优化,以有效抑制渗流危害,提升洞室结构的长期稳定性与安全保障能力。

3 地下水渗透控制与防护技术的应用

3.1 固结灌浆技术的应用与效果分析

固结灌浆技术作为一种有效的地下水渗透控制方法,在水电项目的坝基、隧道及其他地下结构的渗漏防治中得到了广泛应用。基本原理是将特定的灌浆材料(如水泥浆、化学浆液等)注入地下层,填补土层或岩层中的裂隙、孔隙等空隙,从而降低渗透性并增强地基的稳定性。该技术的应用效果显著,尤其在存在裂隙、节理或空隙的岩土体中,灌浆材料填充这些空隙后,能够有效减少地下水的渗透路径,降低水流渗透性,从而防止水流进一步侵蚀坝基或围岩。此外,固结灌浆不仅能够增强地基的抗渗性能,还能提升其承载力,从而对提高工程结构的整体稳定性发挥重要作用^[1]。特别是在坝基或隧道等工程中,地下水的渗透容易导致地基不均匀沉降,而通过固结灌浆的处理,能够有效防止或减缓这一问题的发生。尽管固结灌浆技术具有显著优势,其应用也存在一定的局限性。岩土体的性质、裂隙的分布以及灌浆材料的选择等因素都会影响其效果。在岩层破碎、裂隙复杂或水流量较大的区域,灌浆效果可能受到一定制约。因此,在实际应用过程中,固结灌浆技术通常需要与其他防渗措施,如帷幕灌浆或防渗墙等,结合使用,从而确保工程防渗的全面效果。

3.2 帷幕灌浆技术的设计与实施

帷幕灌浆技术通过在地下土层或岩层中构建一个防水屏障,有效地控制地下水渗透。基本原理是通过钻孔将灌浆材料注入地下,形成一层连续的防水“帷幕”,从而截断地下水的流动路径,防止水流渗入工程结构。这项技术在水电项目中,尤其是在坝基、隧道等关键安全部位,发挥着至关重要的作用。在设计及实施帷幕灌浆时,需全面考虑地质条件、地下水流态及灌浆材料的选择等多方面因素。设计阶段,通常需要进行详细的地质勘察,明确岩土层的性质及裂隙分布,合理确定灌浆孔的布置、深度及间距,以确保防水效果的最大化。灌浆孔的安排必须覆盖整个受水影响区域,而孔距、孔深及注浆量等参数,应根据具体的地质条件进行优化,确保防水层的密实性。常用的材料如水泥浆和化学浆液,在选择时必须考虑其流动性、凝固时间及对周围土层或岩层的适应性。灌浆过程中的压力与流量也需要严格控制,以避免过高的压力破裂岩层或导致渗漏。此外,为确保灌浆效果达到预期目标,在实施过程中应定期进行监测,及时调整灌浆方案,防止漏灌或灌浆不均匀。帷幕灌浆技术的应用具有显著优势,它能够有效地阻断地下水流动,减轻水流对坝基或隧道的侵蚀,

从而提高结构的稳定性。特别是在复杂地质环境中,帷幕灌浆展现出较强的适应能力,尤其适用于裂隙和断层较为复杂的地质体,能够在这些区域形成有效的防水屏障。该技术的实施难度较大且施工成本较高,需要精准控制多个施工变量,以确保达到所需的质量标准。

3.3 化学灌浆技术的适用性与效果分析

化学灌浆技术通过将特定的化学浆液注入地下土层或岩层,借助化学反应在地下形成不透水屏障,从而有效控制地下水渗透。这项技术特别适用于复杂地质环境,如裂隙发育的土层或岩层,其渗透能力和适应性相比传统的水泥灌浆技术更强,能够应对不规则裂隙和微细孔隙。原理是将化学浆液高压注入地下,与水或土层反应形成凝胶,填充裂隙并阻止水流^[2]。常见的化学材料如聚氨酯、环氧树脂和丙烯酸类,它们具备优异的黏结性、抗渗透性和耐久性,能够在复杂地质环境中形成稳定的防水屏障^[3]。化学灌浆广泛应用于水电项目中的坝基、隧道等渗透严重或裂隙较多的区域,它能够有效减少水流渗透提升结构稳定性,尤其适合那些需要精确控制水流方向和流量的工程。由于其固化速度快,化学灌浆能够迅速形成防水层,从而缩短施工周期降低项目成本。化学灌浆在深层地下水或复杂地质环境中的效果仍然存在一定的局限性,其长期耐久性以及对环境的潜在影响也应受到关注。因此,确保技术应用的效果,选择合适的化学浆液和合理的施工方案显得尤为重要。

3.4 防渗墙的设计与施工关键技术

防渗墙是水利工程中一项关键的防渗措施,特别是在水电项目中,它能有效防止地下水渗透对坝基、库岸及隧道等重要结构的侵害。主要功能是在关键区域周围建立不透水屏障控制地下水渗漏,确保工程结构的稳定性与安全性。防渗墙的设计与施工需根据项目所在区域的地质特征及地下水状况来决定其类型和深度,常见的防渗墙形式包括钢板桩墙、混凝土墙以及土工膜墙等,而混凝土防渗墙因其较高的结构强度、优良的稳定性能及对复杂地质条件的适应能力,在实际应用中尤为普遍。在设计阶段,对地下水流动路径、渗透压力及土层渗透性所进行的细致分析,是保障防渗墙长期有效性与耐久性的前提。混凝土防渗墙通常通过连续墙施工技术建造,施工流程包括槽壁支护、导墙布设、成槽作业、钢筋笼吊装以及水下混凝土的浇筑等多个环节。为保证施工顺利推进,前期需完成基坑的规范化开挖与底部地基的清理和整平工作,确保地基承载层具备良好的施工条件。在墙体浇筑过程中,密实性与抗渗性能的控制被视为质量管理重点。为增强防水效果,常采用高强度混凝土同时掺入专用防渗外加剂,不仅要对混凝土拌合物的流动性能和凝结时间进行严格控制,还需确保其能够满足连续施工的技术要求,以便最终形成均匀致密、结构完整的防渗墙体。尤需关注的是墙体接口区域的

渗水隐患,作为薄弱环节部位极易因密封不严而产生渗漏问题。设计过程中必须充分考虑墙体与周边土体及毗邻结构之间的衔接状态,通过有效的密封工艺与结构强化手段,提升连接处的防水能力。只有在每一环节均严格执行质量标准的前提下,防渗结构的整体性能方可得到有效保障。施工期间,地下水的扰动因素难以避免,若未加以合理控制,将对混凝土成型质量造成显著影响。因此,在开工前应完成降排水系统的布设,通过水位的动态调控,有效降低渗水对施工过程的干扰。施工完成后,还需开展系统性的渗漏检测与性能评估,以判定防渗墙是否达到既定密封要求,从而确保整个工程体系具备长期稳定的防渗能力。

4 结语

地下水渗透对水电项目的坝基、库岸以及洞室的稳定性产生了显著的影响。通过对地层岩性、地质构造及地貌特征的深入分析,为工程设计与施工提供了科学依据。固

结灌浆、帷幕灌浆、化学灌浆及防渗墙等技术在实际应用中已取得显著成效,成为控制地下水渗透的关键手段。地下水控制的复杂性促使了技术的不断创新与优化,以应对多变的地质条件和水文环境。结合现代技术与科学方法,水电项目在地下水渗透控制方面的精准度与效率有望进一步提升,从而为项目的安全与稳定运行提供更加坚实的保障。

【参考文献】

- [1] 孙云博,孙文植. 水利水电工程区域构造稳定性浅析[J]. 地下水,2022,44(6):195-196.
 - [2] 吴爱军. 水利水电工程地质勘测的主要方法探究[J]. 工程建设与设计,2022(8):72-74.
- 作者简介:肖文义(1985.5—),单位名称:华东勘测设计院(福建)有限公司,毕业学校和专业:华北水利水电学院,土木工程(岩土方向)。