

岩土体的渗透特性及其在地下工程中的应用

赵帅 412821199312026811

摘要

岩土体的渗透特性是影响地下工程稳定性与安全性的核心力学参数之一，直接关系到渗流场分布、围岩变形破坏以及地下水防控方案的设计。本文首先阐述了岩土体渗透特性的基本概念与影响因素，分析了孔隙率、颗粒级配、岩土体结构以及应力状态对渗透系数的调控机制，其次梳理了渗透特性研究在地下工程围岩稳定性分析、突水突泥灾害防控、渗控工程设计等领域的具体应用，最后针对当前研究存在的不足提出了未来发展方向，为地下工程中考虑渗流作用的设计与施工提供参考。

关键词：岩土体；渗透特性；渗透系数；地下工程；渗流控制

一、岩土体渗透特性的基本概念与影响因素

岩土体是由固体颗粒、孔隙裂隙以及填充于其中的流体共同组成的多孔介质，渗透特性描述的是流体在岩土体孔隙裂隙网络中渗流的难易程度，通常以渗透系数作为核心量化指标。根据达西渗流定律，均匀多孔介质中的渗流速度与水力梯度呈线性正相关，比例系数即为渗透系数，其大小不仅取决于岩土体本身的固有属性，还与渗流流体的物理性质相关，工程领域通常将常温条件下水的渗透系数直接作为岩土体渗透特性的表征参数。

影响岩土体渗透特性的因素复杂多样，首先是岩土体的物质组成与基本结构属性，对于松散土体而言，孔隙率是控制渗透系数的核心参数，孔隙率越大，颗粒间的有效渗流通道越宽，渗透系数越高。同时颗粒级配对渗透特性的影响也极为显著，级配良好的土体中细颗粒会填充粗颗粒之间的孔隙，压缩渗流通道体积，导致渗透系数明显降低，而级配不良的粗粒土往往具有较高的渗透性。对于岩体而言，其渗透特性主要受控于结构面的发育特征，原生节理、构造裂隙以及卸荷裂隙构成了岩体的主要渗流通道，完整岩体的孔隙率极低，渗透系数通常可以忽略不计，而裂隙发育的岩体渗透系数可比完整岩体高几个数量级。

其次，应力状态会显著改变岩土体的渗透特性，地下工程开挖会打破原岩应力平衡，引发围岩应力重分布，当应力超过岩土体的屈服强度后，会产生新的裂隙或导致原有裂隙闭合扩张，进而改变渗流通道的形态与大小。一般而言，围压

升高会压缩岩土体孔隙裂隙，降低渗透系数，而拉应力或剪应力集中会导致岩土体产生宏观裂隙，大幅提升渗透系数。相关试验研究表明，破碎岩体在加卸荷过程中，渗透系数可以发生 2~3 个数量级的变化，这种动态变化特性对地下工程渗流稳定性的影响尤为突出。

此外，岩土体的渗透特性还会受到渗流流体的化学作用影响，地下水携带的化学物质会与岩土体骨架发生溶蚀、沉淀等作用，溶蚀作用会扩大孔隙裂隙尺寸，提升渗透性，而沉淀作用会堵塞渗流通道，降低渗透系数，长期的化学作用甚至会引发岩土体结构的劣化，对地下工程的长期稳定性产生不利影响。

二、岩土体渗透特性在地下工程中的应用

2.1 围岩稳定性分析与变形预测

地下工程开挖过程中，围岩变形破坏是应力场与渗流场共同作用的结果，考虑岩土体渗透特性的流固耦合分析已经成为地下工程围岩稳定性评价的核心方法。在深埋隧洞、深部矿井等地下工程中，高水头地下水会对围岩产生渗透压力，不仅会增加围岩的有效应力，还会软化岩土体力学参数，降低其强度与抗变形能力，只有准确获取岩土体的渗透特性参数，才能精准模拟渗流场的分布规律，进而得到可靠的围岩稳定性评价结果。例如在深埋隧洞开挖过程中，通过现场压水试验获取不同分段岩体的渗透系数，结合数值模拟反演得到岩体的渗透参数空间分布，在此基础上开展流固耦合计算，可以准确预测隧洞开挖过程中围岩的变形与破坏范围，为支护结构的设计提供依据。对于软弱破碎围岩，渗透系数的动态变化会导致渗流场不断调整，进而引发围岩变形持续发展，甚至出现塌方突水等灾害，通过实时监测围岩渗透特性的变化，可以提前预判围岩失稳风险，为施工安全提供保障。

2.2 突水突泥灾害防控

突水突泥是地下工程施工过程中危害极大的地质灾害，其发生与岩土体的渗透特性密切相关。当施工工作面接近富含水断层、岩溶管道等不良地质体时，隔离带岩体的渗透特性决定了渗流发展的速度与规模，随着开挖扰动不断加剧，隔离带岩体裂隙不断扩展，渗透系数持续增大，渗流量逐渐升高，最终导致隔离带岩体失稳突水。因此，在突水危险性评价过程中，岩土体渗透特性是核心评价指标之一。工程中通常通过原位测试获取待开挖区域岩土体的渗透系数，结合隔水层厚度与水头压力，计算突水的临界安全厚度，进而判断突水发生的可能性。对于存在突水风险的区域，通常采用注浆加固的方法改造岩土体的渗透特性，通过

将注浆材料注入岩土体的孔隙裂隙中，固化后堵塞渗流通道，降低岩土体的渗透系数，提升隔水层的抗渗能力，从而达到防控突水灾害的目的。注浆效果的评价核心指标就是改造后岩土体的渗透系数，通常要求注浆后岩体的渗透系数降低到 $1\times 10^{-5}\text{cm/s}$ 以下，才能满足安全开挖的要求。

2.3 地下工程渗控系统设计

水利水电工程中的地下厂房、输水隧洞，以及城市地下空间开发中的深基坑工程，都需要设置完善的渗流控制系统，而岩土体渗透特性是渗控系统设计的核心依据。例如在水库坝基的渗流控制设计中，需要根据坝基岩土体的渗透特性，确定防渗帷幕的深度、间距以及灌浆参数，防渗帷幕的设计要求就是将帷幕区域的渗透系数降低到设计允许值以内，从而减少坝基渗漏量，降低渗透破坏风险。同时，排水系统的设计也需要根据岩土体的渗透系数确定排水孔的间距与深度，合理的排水设计可以有效降低扬压力，提升坝体的稳定性。在深基坑工程降水设计中，需要根据基坑周边土层的渗透特性参数，计算降水所需的井数量、井间距以及抽水流量，若渗透参数取值不准确，会导致降水效果不佳，引发基坑边坡失稳或者周边地面沉降过大等问题。此外，在地下工程的防渗处理中，针对不同渗透特性的岩土体需要采用不同的处理方法，对于高渗透性的粗粒土和裂隙岩体，通常采用高压注浆的方法进行处理，而对于低渗透性的黏性土，则多采用水泥搅拌桩或者地下连续墙进行防渗。

三、研究展望

当前岩土体渗透特性的研究已经取得了丰硕的成果，但是在复杂条件下渗透特性的描述与工程应用方面仍然存在不足。首先，现有研究多针对均匀岩土体开展，对于非均质、各向异性岩土体的渗透特性描述仍然不够完善，尤其是岩体裂隙网络的渗透性模拟，难以精准反映复杂结构面组合条件下的渗流规律。其次，施工扰动以及水岩相互作用下岩土体渗透特性的动态演化机制研究还不够深入，难以实现对长期渗流稳定性的准确预测。未来需要进一步加强多场耦合条件下岩土体渗透特性的试验与理论研究，发展高精度的原位渗透特性测试技术，建立考虑动态演化的渗透特性参数模型，提升地下工程渗流问题分析的准确性，为地下工程的安全建设与长期运营提供支撑。

参考文献

- [1] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.

[2] 谢和平, 周创兵, 李世海. 岩体力学与工程研究的进展与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2690-2697.

[3] 王恩志, 王洪涛, 刘家琦. 裂隙岩体渗流研究进展[J]. 水利学报, 2002, 33(8): 1-7.