

地下水-岩土耦合流动对地下工程长期变形影响研究

李小平 622726198902091374

摘要

地下工程长期变形是威胁工程安全服役的核心问题之一，而地下水与岩土介质的耦合流动作用是引发长期变形持续发展的关键诱因。本文首先梳理地下水-岩土耦合流动的基本作用机制，分析渗流场变化引发岩土体应力重分布与参数劣化的过程，进而探讨耦合作用对地下工程围岩长期变形的影响路径。研究表明，地下水渗流会通过物理潜蚀、化学溶蚀和力学软化三重作用降低岩土体强度参数，持续的渗流-应力耦合会引发围岩变形随时间不断扩展，最终可能导致支护结构失效甚至工程坍塌。针对耦合作用的影响，本文提出地下工程长期稳定性防控应当强化水文地质监测，考虑渗流劣化效应修正变形预测模型，为地下工程的安全设计与维护提供参考。

关键词：地下水-岩土耦合；地下工程；长期变形；渗流劣化；稳定性

一、引言

随着我国交通、水利与城市地下空间开发的快速推进，一大批长大隧道、深部矿井、地下储库等重大地下工程相继投入建设与运营，工程服役周期普遍要求达到百年以上，长期变形控制已经成为地下工程领域关注的核心问题。相比于地上工程，地下工程处于岩土与地下水的复杂地质环境中，岩土体本身具有孔隙-裂隙结构，地下水在岩土孔隙中持续流动，会不断改变岩土体的物理力学性质，同时岩土体变形又会反过来改变孔隙结构与渗流通道，形成相互影响的耦合作用。大量工程实践表明，很多地下工程在完工初期变形处于稳定范围，但在运营数十年后会出现持续的变形增长，引发衬砌开裂、边坡滑移等病害，其中地下水-岩土耦合流动的长期作用是不可忽视的重要因素。

目前，国内外学者针对地下水与岩土体的耦合作用已经开展了大量研究，不少成果聚焦于施工期的突涌水灾害预测与控制，针对长期运营阶段耦合作用引发变形演化的研究相对不足，尤其对不同水文条件下耦合作用影响长期变形的机制还缺乏系统梳理。基于此，本文重点分析地下水-岩土耦合流动的作用机制，探讨其对地下工程长期变形的影响路径，为地下工程长期稳定性评价与防控提供理论参考。

二、地下水-岩土耦合流动的基本作用机制

地下水-岩土耦合流动的核心是渗流场与应力场的相互作用，同时伴随物理、化学多过程的劣化效应，其作用机制可以从三个层面展开分析：

2.1 渗流应力耦合的力学机制

岩土体是由固体颗粒与孔隙流体组成的多孔介质，根据有效应力原理，岩土体的变形由有效应力控制，总应力等于有效应力与孔隙水压力之和。当地下水在岩土孔隙中发生流动时，会改变岩土体内部的孔隙水压力分布，进而改变有效应力的大小与分布，引发岩土体的应力重分布。同时，岩土体发生变形后，孔隙与裂隙的开度会发生变化，孔隙度与渗透系数随之改变，进而影响地下水的渗流速度与渗流场分布。这种应力场影响渗流场、渗流场反过来改变应力场的循环作用，就是地下水-岩土耦合流动的核心力学机制。

2.2 长期耦合过程中的物理劣化机制

在长期的渗流流动过程中，地下水会对岩土体产生持续的潜蚀作用，将岩土体中的细小颗粒从孔隙通道中带走，使得岩土体的孔隙率不断增大，颗粒之间的连接强度不断降低。对于松散土层或者破碎围岩而言，长期潜蚀会逐渐形成渗流通道，甚至引发管涌，导致围岩整体性不断劣化，强度随时间逐步降低。

2.3 长期耦合过程中的化学劣化机制

地下水本身含有多种离子，与岩土体矿物成分会发生长期的水岩化学作用，包括溶解、溶蚀、离子交换等过程。例如，对于含有碳酸盐岩的围岩，地下水会逐步溶解碳酸钙成分，使得岩体内部形成溶蚀孔隙，降低岩体的整体强度；对于含有黏土矿物的岩土体，离子交换作用会改变黏土矿物的晶体结构，引发岩土体膨胀或者收缩，改变岩土体的应力状态。

三、地下水-岩土耦合流动对地下工程长期变形的影响路径

3.1 围岩强度持续劣化引发变形累积

地下工程开挖后，围岩处于较高的应力状态，原本的强度刚好能够维持变形稳定，在地下水长期耦合作用下，岩土体的黏聚力与内摩擦角不断降低，围岩的承载力逐步下降，当承载力不足以抵抗围岩应力时，就会产生新的附加变形。这种变形发展是一个缓慢累积的过程，在运营初期变形增长速率很低，不容易被监

测发现，经过数十年的累积后，变形会逐渐进入加速发展阶段，最终引发工程病害。例如我国西南某运营公路隧道，开通 15 年后出现大面积衬砌开裂，经勘察发现地下水长期溶蚀作用使得破碎围岩强度降低了 40%以上，是引发衬砌变形开裂的主要原因。

3.2 渗流压力引发支护结构附加变形

地下工程的支护结构不仅需要承受围岩压力，还需要承受地下水的渗透压力，在长期耦合流动过程中，渗流场会不断调整，围岩孔隙水压力也会发生变化，对支护结构形成持续变化的附加荷载。当围岩发生劣化后，渗透系数增大，渗流量增加，支护结构承受的渗透压力也会随之增大，引发支护结构产生附加变形。对于排水系统失效的地下工程，渗透压力会不断累积，甚至超过支护结构的设计承载力，导致支护结构发生过大变形，出现开裂破坏。

3.3 耦合作用加速岩土体蠕变变形发展

岩土体本身具有蠕变特性，在恒定应力作用下变形会随时间缓慢发展，而地下水的耦合作用会进一步加速蠕变过程。水的软化作用会降低岩土体的黏聚力，使得岩土体在相同应力下的蠕变速率大幅提升；同时，耦合作用引发的强度劣化会使得围岩的有效应力不断增大，进一步加快蠕变变形的发展速度。很多深部地下工程，地应力水平本身较高，地下水耦合作用会使得围岩蠕变从稳态蠕变进入加速蠕变阶段，最终引发大变形灾害。

四、地下工程长期变形防控的相关建议

基于地下水-岩土耦合流动对长期变形的影响机制，地下工程设计与运营维护过程中，应当从三个方面强化长期变形防控：第一，在工程勘察阶段应当强化水文地质条件勘察，准确获取地下水的分布、流向以及水化学特征，充分评估地下水长期作用对岩土体的劣化效应，在变形预测与稳定性分析中计入耦合作用的影响；第二，完善排水系统设计，通过合理设置排水结构降低孔隙水压力，减少地下水对围岩的长期作用，同时采取防渗措施降低地下水的渗流速度，减缓潜蚀与溶蚀作用的发展；第三，在运营阶段建立长期水文与变形监测体系，实时掌握渗流场与变形的变化趋势，当变形出现异常增长时及时采取注浆加固等补强措施，避免灾害发生。

五、结论

地下水-岩土耦合流动是引发地下工程长期变形持续发展的关键因素，其通过力学耦合、物理劣化与化学劣化的共同作用，不断降低岩土体强度，改变围岩应力状态，推动变形逐步累积。工程实践中，长期变形的发展是一个缓慢的过程，容易被忽视，但其对工程安全的威胁十分显著。未来地下工程长期稳定性研究需要进一步完善多场耦合作用下的长期变形预测模型，考虑参数劣化的时间效应，提升长期变形预测的准确性，为地下工程百年服役目标提供支撑。

参考文献

- [1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [2] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [3] 杨天鸿, 张宏涛, 徐世民, 等. 岩石渗流-应力-损伤耦合作用理论及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2003-2015.