

岩土工程中地下排水系统对边坡稳定性的控制效应研究

徐丽霞¹, 邵坚强²

(1. 青岛蓝豆建筑工程有限公司, 山东 青岛 266404;

2. 青岛启核建筑工程有限公司, 山东 青岛 266700)

摘要 地下排水系统作为提升边坡稳定性的重要手段, 其核心原理在于疏干地下水改善坡体应力状态和改变渗流状态。该系统通过降低孔隙水压力、改善渗流场、改善岩土体渗透性及防止时态变形等多重作用, 实现渗流状态调控与岩土体性质改良。结合水平排水孔、地下廊道及地表地下结合等典型工程实践, 证实了该类系统在消除水质隐患方面的显著成效。针对复杂的水文地质情况, 构建科学、合理、有效的排水系统, 对于实现岩土工程长期的安全目标具有重要的意义。

关键词 岩土工程; 地下排水系统; 边坡稳定性; 控制效应

中图分类号: TU46

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.020

0 引言

边坡失稳往往因地下水作用加强而严重影响工程项目的安全性, 同时对人民群众的生命财产造成巨大危害, 所以进行排水防治刻不容缓。地下排水工程通过积极干预坡体内地下水状况, 作为治理这类地质灾害的主要手段之一, 从原理研究到工程部署运用, 地下排水系统通过水力学、土力学及流变学等方面共同作用控制坡体稳定性。探明地下排水系统的结构特点与稳定提升的作用机理, 对丰富岩土工程的设计方法, 拟定有效的防灾抗灾措施, 推动相应工程技术不断发展具有重要作用。

1 地下排水系统控制边坡稳定性的理论基础

地下排水系统控制边坡稳定性原理的核心是通过变动边坡内部的地下水渗流场以减少致灾动力, 提高坡体抗滑力。而地下水在岩土体内形成的静水压力、动水压力是诱发边坡失稳的主要外力, 地下水长期浸润又会软化滑带土, 显著降低岩土体的抗剪强度指标。地下排水系统通过水平排水孔、排水盲沟、竖井等方式强制改变地下水流动路线, 迫使原来积聚在滑面附近的渗流向排水设施集中汇集并引出, 从而导致坡体内地下水位线大大降低, 在此过程中, 随着水位下降, 作用在潜在滑面上的孔隙水压力、浮托力大大减小, 渗流对坡体的推压作用降低, 一部分饱和土区又可转变

为非饱和土区, 基质吸力得以恢复, 土体的有效应力增加, 有效应力的加大直接转化成土体抗剪强度的提高, 使边坡抵抗剪切破坏的能力大大加强, 此外, 排水过程还可避免土体由于长期处于饱水状态发生物理化学性质变差, 保持土体结构的整体性, 所以从“水—土”的相互作用关系上, 地下排水系统实现了从减少下滑力、增大抗滑力两个方面对边坡稳定性的双控作用^[1]。

2 典型地下排水系统类型及特点

2.1 水平排水孔技术

水平排水孔是边坡治理最为常用的措施之一, 其主要优点为可以直接布置到坡体内深部的含水层段, 在对坡体扰动很小的情况下进行有效排水。实际施工过程中, 一般采用钻机沿相应部位钻设具有一定倾角的平孔, 孔内安放透水管外包裹土工布滤层, 这样相当于在坡体内部置入了若干个“毛细血管”, 可将坡体内的深层地下水引出坡外。因此针对地下水埋藏深度较大, 含水层渗透性较好的岩石或土层边坡而言是比较适宜的一种排水措施。水平排水孔具有施工方便、投资相对较少及见效较快等优点, 可根据现场出水量大小因地制宜地确定孔数、孔距以及孔长, 构成疏密程度不同的排水系统; 但是施工时需注意精准控制仰角角度、防止汇水, 还需在运行使用中避免因砂石土的流失造成管壁堵塞等问题的发生, 需要结合定期清

作者简介: 徐丽霞(1990-), 女, 专科, 研究方向: 岩土工程。

理来确保其长期的排水功能，以达到稳定有效地降低地下水位及孔隙水压力的效果。

2.2 地下排水廊道（隧洞）与竖井组合系统

地下排水廊道体系是大断面、强能力深部排水方案的一种，一般是由布置在边坡滑面以下的排水隧洞和与其联通的若干竖直方向排水井群组成。排水廊道体系在大型水利水电工程、矿区以及巨型滑坡治理中显示出极为显著的管控效果，其排水原理就是在稳定的岩层之中挖掘出一条主隧洞作为汇水导槽，然后向下布置一系列的竖井贯穿整个滑带，将上覆岩土体中的水分汇聚到底部的排水隧洞排出。与地表排水或小型钻孔不同的是，排水廊道能够绕过滑面的困扰，不会因为整体坡体缓慢蠕动而遭到破坏，具有非常高的耐久性，具有较强的防灾能力，既可以大量抽排降低坡体地下水位，又可以通过廊道开展地质巡查、深部位移观测等任务，兼具侦查与治理的功能。虽然工程量巨大，施工时间长，地质勘测要求高，但是对于处理那些水量丰富、滑体厚实或者排水可靠性要求非常高的复杂边坡而言，这无疑是在维护工程项目安全的最有力的武器之一^[2]。

2.3 地表与地下结合的截排水骨料系统

地表截排水与地下盲管结合的骨料排水系统主要着眼于对补给来源加以控制，并引导浅层土壤水，目的是建立一道阻止雨水下渗的整体屏障，该排水系统一般将坡面顶端布置成截水沟拦截地表径流，而将坡体内部分布填理由碎石或者卵石组成的盲沟，以疏松骨料的大空隙率为通道建立起一种渗透系数极大的透水层，在易产生浅层滑移或受降雨下渗影响较大的土质边坡当中可及时地下下渗排除地表入渗雨水，避免坡体内蓄积渗透水形成浸润线。该种排水方式结构特征在于一般是在粗骨料外包裹一层无纺土工布使得水流顺利通过的同时又起到拦截土粒的作用，从而杜绝了因为管涌造成整体结构骨架的破坏。此种排水方式施工方法简单且明了，可以有效地减少坡体浅层区内的饱和程度，解决因降雨频繁导致的土体湿软的问题，经常和其他深层防护措施联合应用，作为边坡综合防水系统的最底层基础，从根本上消除降雨造成的边坡不稳定因素。

3 岩土工程中地下排水系统对边坡稳定性的控制效应

3.1 降低地下水位与孔隙水压力的力学效应

地下排水系统对于边坡稳定最基本的作用，就是以物理抽排的方式强行改变坡体内地下水的渗流场、

从而大幅度地降低了滑带附近区域内的地下水头高度及其孔隙水压力。在绝大部分边坡失稳实例之中，地下水既是最先触发边坡变形的因素，同时也是造成边坡抗滑能力损失殆尽的根本原因。当其内部水位较高时，孔隙水会在整个岩土骨架中造成极大的孔隙水压力，这部分压力会直接与作用于滑移面处的法向有效应力相互抵消掉。根据经典的太沙基有效应力原理可知，土壤的抗剪强度是与其所受到的有效应力大小成比例关系的。孔隙水压力越大，则有效应力就越小，意味着边坡抵抗发生剪切破坏的能力就会受到极大的减弱，如同在本来紧紧接触在一起的两块物体之间挤进大量高压稀薄润滑油一样，它们会变得非常容易脱落。

排水设施（包括水平排水孔、排水涵洞等）的作用在于给储存在边坡内部的地下水提供一条低能量位差的排放路径，破坏原有的静态水压均衡状态。随着地下水持续流出浸润线也明显降低原本淹没在滑床的自由水面逐渐变窄甚至消失，孔隙水压力迅速下降这一过程也不是单纯的直线下降，是随着排水时间的增长有效应力逐渐在滑动面上聚集与回复，使得有效应力增大，颗粒之间的啮合力加强，摩擦阻力相应增大，在宏观层面就实现了边坡安全系数的显著提高。这一作用机理对于雨后的排水尤为重要，它可以及时地消除瞬时饱和导致的过量孔隙水压力，避免边坡在降水结束后的几小时或几天内发生延时性失稳，从根本上稳定了其受力平衡结构。

3.2 削弱动水力与优化渗流场的水力学效应

地下排水系统对治理边坡稳定问题也有改善渗流场结构、显著降低有害动水力的重要水力学效果。在天然状态尤其是遇到暴雨天气或水库水位发生剧烈升降的情况下，边坡内部常产生较为复杂的不稳定渗流场，在地下水流经土颗粒之间的孔隙时就会对骨架产生一个渗透力（即动水压力），这个渗透力的方向是顺着渗流的方向并且它的强度也随水力梯度的增大而提高，如果水力梯度过大，这个渗透力就会转化成很大的推力，推动土体向临空面推移，并且会造成渗透破坏以及管涌的情况出现，冲刷掉边坡底部，造成边坡整体失稳^[3]。

排水工程的作用，其实就是对边坡原有渗流场进行了一个人为调整的过程。在坡面上布置合理的排水体系后，原先向坡脚或者深部滑移面排泄的地下水，就会被有组织地拦截、导向至排水口处排出，在此过程中渗径大缩短，水力梯度得到了有力的削减，如此一来，渗流场内的等势面形状就变得更加平顺了，原来那些

高水力梯度的风险地带也消失了或是迁移到了更安全的位置,如坡脚设排水沟,就可以显著地消减出逸比降,减少流土的发生风险;坡体内设排水廊道就可以把原来往坡体表面排泄的降水汇集起来排出,不至于使坡面遭受长期的冲蚀而崩坏。经过处理之后的新渗流场就不会再出现强大向坡外地应力,而是会将因为降雨入渗导致增加的富余水头势能从排水系统中释放出来,也就不会再有渗流作用对边坡稳定性的不断侵害了,在暴雨条件下也能做到边坡动态水力稳定^[4]。

3.3 改良岩土体物理力学性质的软化效应

地下排水工程对边坡稳定的影响在于对岩土体材料自身物理力学特征方面的远期优化,具体而言就是改善由于地下水浸润引起的岩土体材料破坏及软化问题。岩土材料中尤其是对于粘土、泥岩、页岩等强风化带的材料均有明显的亲水特性,在其长期饱水或者高含水量的情况下,水分既会充填于颗粒间的空隙,也会充填于矿物晶体结构内部,甚至会冲刷掉颗粒之间的胶结物,从而使得土体结构趋于疏松,骨架崩溃,在宏观上的表现就是粘聚力与内摩擦角出现大幅下降,这称之为“软化”。

排水工程通过连续无休的抽排影响,能够显著地减少坡体特别是滑动带土体的含水量,岩土体将由原先的饱水状态转变为非饱和或弱饱水状态,在排水过程中及完成之后伴随着水分的渗出与蒸发,局部区域的非饱和土的基质吸力得到恢复,这部分吸力在土体内起到一种特殊“粘聚力”的功效,提升了土体的抗剪性能,最关键的是干燥条件阻止了水-岩反应体系进行,从而避免了矿物的水化分解以及崩碎,保持了土体结构的稳固。针对具有膨胀性矿物成分的边坡,排水还可以阻止因吸水膨胀带来的庞大胀缩力,阻止了裂隙的发展贯通。可以说排水工程排走的不仅仅是“水”,更是起到了固表护根的作用,排水工程通过对岩土体物理力学参数指标的维持达到了切除斜坡体自身抗剪性能随时间衰退这一病灶的效果,为边坡的安全稳定奠定了物质基础^[5]。

3.4 控制滑体变形与抑制蠕变的时效效应

地下排水设施对防治边坡延时变形及遏制长期蠕变有着不可忽视的作用,在处理含有较强流变性质的软岩层或淤泥质土体边坡问题上显得至关重要。岩石、土体属于典型粘弹性材料,在受到恒重应力条件下会发生随时间延长而逐渐发展的细小形变,称为蠕变,而地下水正是导致该情况发生的重要原因之一,水作为润滑

剂可大大降低各颗粒之间的相互摩擦力,同时长期应力作用会促使岩土骨架发生变化重新排序组合,从而使整个边坡呈现出持续的移动直至加速失稳的趋势^[6]。

而良好的地表排水措施,则在很大程度上切断了地表雨雪径流渗入滑坡的通道,使滑坡内部保持干燥,从而减少了滑坡发生滑动的可能性。另外,对于某些滑坡来说,其地下水补给水源主要来自大气降水,在降雨量大的年份,地下水补给充沛,往往会导致滑坡变形加剧,甚至出现滑动破坏;而在干旱少雨的年份,地下水缺乏补给,滑坡变形较轻,有时甚至是稳定的。如果能够采取有效的地表排水措施,阻断地表雨水向滑坡体内渗透,就相当于削弱了滑坡体地下水的主要补给源,使地下水位持续下降,也就相应降低了滑坡发生的概率。因此,地表排水系统对于削减滑坡失稳变形具有重要的作用。

4 结束语

地下排水体系对边坡的整体稳定起到了良好的加固作用。它通过降低地下水位,改善水流状态,增强土壤结构,以及控制变形来达到整体加固的效果。各种地下排水设施的布置均有自身的特点,在实际的应用当中根据地形进行相应的搭配使用,可以很大程度上提高地质工程抵御不良环境的能力。随着科学技术的发展,新型材料的应用,以及新型检测仪器的研发,地下排水的设计可以更准确、更高效,继续探究地下排水深层的作用机制,完善相关工程技术的应用,必定会为地质灾害防护带来更加有力的支持,促进地质工程的安全治理发展到一个新的高度。

参考文献:

- [1] 孙明星. 岩土工程设计中地下水对边坡稳定性的影响研究[J]. 门窗, 2024(14):112-114.
- [2] 陈泽虎,陈先岳,王越,等. 岩土工程中地下水位对边坡稳定性的影响分析[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2024(03):198-201.
- [3] 朱学亮,邵帅,党康宁,等. 考虑初始结构性的三维黄土边坡地震稳定性分析[J]. 工程力学, 2025(42):1-12.
- [4] 王东亮,刘静. 研究岩土工程边坡稳定性影响因素及防护措施[J]. 读报参考, 2025(08):175-176.
- [5] 刘兴起. 地下水位变化对岩土工程边坡稳定性的影响分析[J]. 建筑与施工, 2024(20):34-35.
- [6] 罗廷勇. 建筑基坑岩土工程边坡稳定性评价方法创新设计与应用[J]. 城市建设, 2025(11):72-74.