

地下水渗流对边坡稳定性的影响及防控路径分析

邓继国 熊 升

湖北省城市地质工程院 湖北武汉 430051

摘 要: 文章主要分析地下水渗流对边坡稳定性的影响机制, 深入研究地下水渗流对斜坡失稳的影响机理, 研究发现在边坡中, 地下水渗流通过力学方面以及介质破坏影响边坡的稳定性。当土体中的孔压增加时, 土体的抗剪强度下降, 而渗透力的增加则会导致滑坡的发生; 在介质退化方面, 主要表现为土的管涌性和裂隙的扩展和风化。并针对此提出从源头截渗, 过程导渗以及通过构建支护体系等防控手段的联合应用, 为保障边坡的稳定性提供科学依据。

关键词: 地下水; 渗流; 边坡; 稳定性

在公路、桥梁和水利水电等工程中, 经常要进行大规模的边坡开挖和回填工作。边坡已经成为建筑施工的常见结构, 它的稳定与否对整个工程的安全与运营至关重要。滑坡、崩塌等地质灾害, 给工程建设带来巨大损失, 给当地的生态环境带来深远的危害。在众多影响边坡稳定性的因素中, 地下水渗流是最为关键且复杂的因素之一。开展地下水渗流作用下边坡稳定性研究, 探索防治措施, 是当前迫切需要解决的重大问题。研究不同条件、不同类型地下水流条件下, 土体的饱和度、孔隙水压力、剪切强度等物理特性的变化规律。从排水、止水 and 护坡三个角度出发, 研究各种防治措施的原理、适用条件及应用效果。结合实际案例, 对滑坡防治措施进行改进, 以改善滑坡的稳定与安全。

一、地下水渗流对边坡稳定性的影响

地下水渗流是边坡失稳的关键诱因, 其对边坡稳定的破坏效应并非单一维度, 会通过力学和介质退化等多个方面的共同影响, 与各种条件作用, 逐渐弱化边坡的抗滑性能, 进而引发滑坡。渗透效应从机理到介质破坏, 直至特定条件下的灾害演变, 具有“作用直观、过程渐进、后果严重”的特点, 需要从多个层面进行深刻剖析。

(一) 渗流产生的力学效应减弱边坡平衡

边坡失稳机理的关键在于力学稳定性被破坏, 地下水渗流通过增加孔压增加和渗透力的双重叠加, 使边坡失去受力均衡, 从而导致坡体的剪切和抗滑性能下降, 表现在疏松土和破裂岩石的边坡上^[1]。从孔隙水压力升高方面看边坡岩土体的抗剪强度由有效应力决定, 当地下水在边坡中流动时, 如果排水环境受到阻碍, 土体中

的孔隙(或裂缝)中的水就会不断累积, 从而引起土体中的孔压大幅增加。当土体中存在着大量的孔隙压力时, 由于孔压升高, 岩石内部的有效应力减小, 从而减小了颗粒之间的咬合力和摩擦阻力。反之, 当孔压上升到与全应力相近的“悬浮”形态, 其有效应力趋于零, 剪切强度大大降低, 甚至在平缓的斜坡上也很容易出现流滑破坏。渗透力是指地下水通过水流作用于岩体内部的一种附加力, 其强度与水流压力呈比例关系, 且与水流的流动方向相同。在边坡内侧, 渗流一般从坡顶或坡内流向坡底, 因而对边坡具有“推力”作用。在均匀土质边坡中, 渗流作用将导致土壤中的土粒子承受向下的荷载, 等效地增大了斜坡的下滑力, 并减弱了颗粒之间的摩擦阻力; 在裂缝型边坡中, 渗流场将沿着裂缝表面产生, 不但促使岩石沿着裂缝滑移, 而且会加速裂缝的开启和发展, 从而产生新的流动通道。如岩质路堑边坡, 降雨进入后, 水沿着岩石层理或裂隙渗流, 并沿着弱结构面进行渗透, 并逐步突破了岩石之间的结合力, 引起斜坡沿着结构性面的顺层滑移。

(二) 渗流引发的介质劣化效应渐进破坏边坡结构完整性

除了受直接的机械作用, 地下水渗流也会使边坡岩石—土壤等材料发生物理和化学作用, 使其物理和化学特性发生变化, 并弱化其本身的强度, 从而导致“渗透—退化—失稳”的循环。由于岩土体种类差异, 其退化作用呈现显著差异, 但本质上都是通过损伤介质的结构性而导致斜坡的整体失稳^[2]。对于土质边坡来说, 渗流引起的介质退化以粒子损失和结构性损伤为主。在

疏松沙(粉沙)边坡中,由于水动力作用,会将细粒(如粉粒、粘粒等)沿孔道运移,待流速达到一定程度后,细粒被逐步运出,从而产生“管涌”通道,早期管涌通道很小,对边坡的作用不大,但随渗流的进行,其内部空隙越来越大,导致土的骨架被挖空,孔隙率增加,导致整个结构疏松,从而导致其剪切强度大幅降低。若渗透速率太大或土壤内聚力不足,则可能引发结构性失效(流土):整个土体都呈悬空状态,丧失剪切力,呈现“流动化”的不稳定。地表隆起、裂隙发育是地表隆起、裂隙扩展的主要形式,其破坏区域呈突然扩展的趋势。与管涌的发展过程相比,滑坡在短期内会引起边坡的部分或全部的失稳,并且其损伤后的土体结构很难复原,其治理比管涌要困难得多。在化学作用方面,地下水对岩石的侵蚀是一个不容忽视的过程,地下水中等离子能与岩石中的碳酸盐矿物(如方解石)、硫酸盐(如石膏)等进行反应,形成易溶盐,并随着水的流动而损失,从而造成裂隙壁面粗糙度下降。在此过程中,岩体内部的剪切内摩擦角下降3~8度,内聚力下降15%~30%,并将裂缝扩展为“溶蚀孔洞”。

(三) 典型工况下的渗流影响规律

降雨是一种短时高强度的渗流源,其作用是“迅速补充—渗流场重建”,导致边坡失稳。暴雨初始阶段,降雨进入斜坡表土层,导致其由非饱和向饱和转变,其渗透性提高1~2个量级,且渗流速率大幅提高。随着降雨的进行,地表(0.5~1 m)逐渐扩展至2~5 m的“饱水渗透带”,在这一地区,孔压急剧上升,有效应力急剧下降^[3]。更重要的是,雨水的入渗过程会引起边坡的渗流场发生“突变”:原有的渗流通道被新的饱和区所阻断,从而产生了“部分渗流强化区”,从而使边坡的渗压沿坡向大幅增加。此外地下水位的周期性变动在“应力循环”和“介质退化积累”的作用下将使边坡的稳定逐渐弱化,这种作用是隐形的、长期性的。在地下水位抬升过程中,坡体(岩石)含水量增加,孔压增加,有效应力减小,而随着水位的升高,地下水的抬升将促使其向临空面移动,从而导致边坡的渗透性增加。在地下水消落期,尽管孔压有所减小,但在消落期,“渗流逆向效应”和“介质失水”也会对坡体稳定性造成危害。

二、地下水渗流对边坡稳定性的影响的防控路径

前期研究发现,地下水渗流不但会导致边坡孔隙水压力升高,形成渗透作用,进而导致土体管涌土和岩体裂隙的扩展和溶蚀,导致介质的不可逆退化。雨水渗透

引起的渗流场的突变性增加了滑坡的危险性,而随着水位的持续变化,其累积稳定性也随之降低,对整个工程的安全性构成了极大的挑战。为此,迫切需要建立一套有针对性地解决滑坡灾害、保证边坡长效稳定性的科学防治途径。

(一) 从源头上减少地下水渗流

“源头控制渗透”的关键在于“截断”或“削减”地下水补给来源,通过对地表径流的拦截、疏导和封闭,从根本上实现“消减”边坡渗流,防止边坡介质退化和力学平衡破坏。一方面建立地表排水系统,根据“分区拦截,顺势疏导”的原理,建立多层次的排水系统,减少了降雨的存留和入渗。应根据边坡的坡度和集流情况进行排水,在坡度5~15度的斜坡上,每隔20~30米,在等高线上布置梯形的截水沟,沟宽0.4~0.6米,深0.5~0.8米,保证雨水能够及时流出;对于坡度>15度的斜坡,应增加纵排槽,并与其组成“网格状”的排水体系,并在坡面上设置土工织物反滤,以避免冲淤和阻塞^[4]。如果边坡周围有生态保护需要,可以选择狗牙根、紫花苜蓿等耐干旱、根系发育良好的植物,对雨水进行拦截。另一方面进行地下截渗,在渗透率高的地区,如砂卵石和粉土,采取冲凿成槽技术,墙体厚度0.6~1.0米,渗透系数需 $<1 \times 10^{-6}$ cm/s,适用于深度>10 m的截渗需求。对于裂缝发育的斜坡,采用双向搅拌技术,搅拌桩长达0.5~1.0 m,且渗透系数小于 $1 \times 10^{-10} \sim 10^{-13}$ cm/s;采用水泥-水玻璃双液浆液进行化学注浆,注压0.3~0.5 MPa,经裂缝充填后,将岩石的渗透性提高1~2个量级。

(二) 通过导渗疏导边坡地下水

过程导渗的关键在于构筑一套内在的排水系统,将边坡上积存的地下水迅速排出,减少孔压,减缓渗流效应,防止土体的劣化,保持坡体的受力状态。根据边坡的不同深度渗流,设置排水孔(管),达到分级导流的目的。竖向泄水孔常被应用于浅层地下水位的泄水孔,其布设的深度要求在0.5~1.0米之间,在粘性土边坡,通常在3~5米处,砂性土的边坡可以增加至5~8米;将渗透性较差的岩层压缩到3~5 m,以保证高效的排水性。采用水平排水系统对边坡的横向渗透进行导流,其埋设地点为边坡的潜在滑裂面0.5~1.0 m,坡度为2%~5%,确保保面流畅;选择孔径在8~12毫米的PVC套管,孔距为15~20厘米,外覆土工织物反滤,以避免土壤微粒阻塞通道^[5]。盲沟和渗沟适宜于引导浅层的孔隙水流,

并利用可渗透的物质加快排泄速度。盲沟多设置在边坡上,其形状为梯形,底部宽度0.6~1.0米,深1.0~1.5米,内填入级配碎石(直径20~50 mm),孔隙率大于35%,能使边坡表层的浅层水分迅速排除。渗沟由外侧向内侧布置20~30厘米的中细砂(反滤层)和30~50厘米的砾石(排水层),在沟槽底部设置有渗透性的排水系统;为了避免细粒土渗入排水层中,保证了其长效的排水性,适合于粉土和粉质粘土边坡。

(三) 加固边坡结果提升抗渗性能

通过构筑支护体系,在提高坡体抗滑能力的同时,封堵渗流通道,达到“防滑—防渗”的双重保护效果,适合中、高危险性的边坡或复杂的地质环境。支护体系中构建抗滑桩,利用桩身承担坡体的滑移量,并与其相结合的防渗漏措施,实现了对滑坡的有效控制。在受力分析中,采用“悬臂梁”或“基础梁”的方法来进行抗滑桩的受力分析,既要考虑桩体的弯矩、剪力和轴力的作用,又要使桩顶的位移小于10 mm,使桩的最大弯矩不能大于混凝土的最大弯曲。在桩基和桩基之间以不锈钢管搭扣方式进行热焊,构成一道防止桩间横向渗透的连续隔水隔墙,防止由于渗透性软化引起的桩基础破坏。构建锚索对岩石进行“主动约束”,抑制裂缝的发展,并通过对灌浆过程的控制来提高岩石的防渗性能。锚索对岩石破裂的制约效应表现为:通过对裂隙围岩的预张力(50~200 kN),将围岩紧紧地连接在一起,增大了围岩的法向应力,从而提高了裂缝的剪切强度。锚杆采用多股钢丝绳配置,可以有效地分散受力,防止裂纹的集中发展。除了构建支护体系,还需要在边坡中应用土工合成材料实现“防渗—加固—导渗”多功能整合。选择与坡面

环境相匹配的土工膜:坡面上使用光滑的高密度聚乙烯薄膜(1.5~2.0毫米),以满足坡面的坡度;为了增加与土壤的摩擦,防止滑动。

结束语

地下水渗流对边坡稳定的作用实质是水—岩石(土)交互作用下的力学平衡不稳和介质劣化的耦合作用,需要打破传统“单一控渗”和“单纯加固”的限制,建立“源头封堵—工艺引导—构造增强”的协调机制。通过以上研究,将阐明渗透机理和介质退化机理,为防治措施的制定奠定基础。通过对源头控制、过程导渗和结构加固等三种防治手段的实际运用,证明了“因地制宜,多技术融合”防治思想的可行性。

参考文献

- [1] 张永华,李延泽,张东华.地下水影响下的边坡失稳特征分析[J].能源与环保,2025,47(04):15-20+27.
- [2] 何海龙,王鹏胜,薛陆,等.地下水运移对露天矿山边坡的影响探析与渗流减缓措施研究[J].甘肃科学学报,2024,36(03):90-99.
- [3] 姜楠,张安然,张芳,等.裂隙水作用下岩质边坡平面滑动力学模型[J].公路交通科技,2024,41(02):88-95+104.
- [4] 解振乙.地表水入渗耦合地下水渗流作用下边坡失稳研究[J].建筑技术开发,2023,50(12):130-132.
- [5] 陈杰,赵忠岩,吴宇富.软弱外倾结构面和地下水渗流影响下岩质边坡的勘察要点分析[J].低碳世界,2023,13(09):32-36.