

土壤含水率变化对浅层边坡失稳的影响分析

张徐

山西省煤炭地质一四八勘查院有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i1.2409

[摘要] 浅层边坡失稳是工程地质与岩土工程领域常见的安全隐患,土体含水率的动态改变是引发失稳现象的重要外部条件。本文针对含水率变动对浅层边坡稳定状态的影响机理开展研究,分析含水率上升阶段边坡土体力学性能弱化、内部结构破损与应力场重新分配的内在规律,阐释降雨入渗、地下水位起伏等水文过程作用下边坡失稳的启动方式与发展态势,结合边坡固有构造特征,论述含水率变动与滑移、塌落等破坏形态的客观联系,归纳不同含水率区段稳定程度差异及关键作用条件,为边坡灾害预判、防控措施设计与工程安全评价提供理论支撑,助力复杂水文环境下边坡工程长期服役状态与安全水平的提高。

[关键词] 浅层边坡; 土壤含水率; 边坡失稳; 边坡稳定性

中图分类号: Q938.1+3 **文献标识码:** A

Analysis of the Impact of Soil Moisture Content Changes on the Instability of Shallow Slopes

Xu Zhang

Shanxi Coal Geology 148 Exploration Institute Co., Ltd.

[Abstract] The instability of shallow slopes is a common safety hazard in engineering geology and geotechnical engineering. The dynamic change of soil moisture content is an important external condition that triggers instability. This paper studies the influence mechanism of moisture content changes on the stability of shallow slopes, analyzes the internal laws of the weakening of mechanical properties, internal structure damage, and stress field redistribution of slope soil during the rising stage of moisture content, explains the initiation mode and development trend of slope instability under the action of hydrological processes such as rainfall infiltration and groundwater level fluctuations, and discusses the objective connection between moisture content changes and failure modes such as sliding and collapse in combination with the inherent structural characteristics of the slope. It summarizes the differences in stability levels and key influencing conditions in different moisture content sections, providing theoretical support for slope disaster prediction, design of control measures, and engineering safety evaluation, and contributing to the improvement of the long-term service state and safety level of slope engineering in complex hydrological environments.

[Key words] Shallow slope; Soil moisture content; Slope instability; Slope stability

引言

浅层边坡广泛分布于道路沿线、建筑场地及山地丘陵区域,其稳定性直接关系到工程建设安全与周边环境稳定。在自然与工程扰动共同作用下,土壤含水率时刻处于动态变化之中,这种变化会持续改变土体物理力学性质,成为引发浅层边坡突发失稳的重要诱因。近年来,由含水率异常变化导致的浅层滑坡、塌滑等灾害频发,造成不同程度的经济损失与安全风险。深入认识含水率变化对浅层边坡失稳的影响规律,准确把握两者之间的内在联系,对完善边坡灾害防控体系具有重要

现实意义。本文以此为切入点,系统分析含水率变化作用下浅层边坡的响应特征与失稳机理,为后续相关研究与工程实践提供基础支撑。

1 浅层边坡失稳的主要影响因素分析

浅层边坡失稳的影响因素中,土壤含水率变化是最活跃且影响最直接的因素之一,其变化会直接改变边坡土体的基本物理力学性质,进而破坏边坡的平衡状态。在实际工程场景中,浅层边坡土体多为残积土、粉质黏土等,这类土体的孔隙结构较为疏松,吸水性强,当土壤含水率升高时,水分会填充土体内部的

孔隙,降低土颗粒之间的紧密程度,导致土体的密实度下降、容重增加,无形中增大了边坡的下滑力,为边坡失稳埋下隐患。含水率的变化还会影响土体的渗透系数,使水分在边坡内部的渗透速度和渗透深度发生改变,进一步破坏土体结构的稳定性。动态影响区整体含水率低于动态闭合区,这主要是由于动态地裂缝的出现打乱了原有的水分流动及含水带分布,增加了水分散失的途径。

土壤含水率的波动会显著影响土体的抗剪强度,而抗剪强度是维持浅层边坡稳定的核心指标,这一影响在雨季表现得尤为明显。当土壤处于干燥状态时,土颗粒之间的摩擦力和黏聚力较大,土体抗剪强度较高,能够有效抵抗边坡下滑趋势;而当降雨入渗导致含水率升高时,水分会在土颗粒表面形成润滑膜,削弱颗粒间的摩擦作用,同时降低土体的有效应力,导致黏聚力和内摩擦角均出现不同程度的衰减。实际监测发现,当土壤含水率超过一定阈值后,土体抗剪强度会急剧下降,此时若边坡坡度较大,极易发生浅层溜滑、坍塌等失稳现象。

土壤含水率变化还会引发土体的体积变形,间接加剧浅层边坡的失稳风险,这种影响在膨胀土、粉质土构成的边坡中更为突出^[1]。干燥状态下的土体体积相对稳定,而当含水率增加时,部分土体颗粒会吸收水分发生膨胀,导致土体体积增大,产生膨胀压力,使边坡内部出现应力集中;当含水率降低时,土体又会发生收缩,产生裂隙,这些裂隙会成为雨水入渗的通道,进一步加快含水率的变化节奏。反复的干湿循环会使边坡土体的裂隙不断发育、扩大。荒漠草原区域的监测数据显示,土壤含水率会随季节呈现规律性变化,前一年11月至次年6月底土壤水分整体持续下降,5-6月下降速率最快,浅层土壤含水率下降快于深层;7月后随天然降水增加逐步恢复,且浅层土壤含水率变化幅度显著大于深层。这会破坏土体的整体性,导致浅层土体与深层土体分离,最终在重力作用下发生失稳破坏。

2 土壤含水率变化对边坡土体特性的作用规律

土壤含水率的变化会直接改变浅层边坡土体的基本物理特性,这一作用规律在实际工程场景中表现得尤为明显。在自然状态下,浅层边坡土体处于相对稳定的非饱和状态,土颗粒间通过基质吸力相互联结,形成一定的结构强度^[2]。当遭遇降雨、地下水补给等情况导致含水率升高时,水分会逐渐填充土体孔隙,削弱土颗粒间的基质吸力,使土体的孔隙比增大、干密度降低。土壤含水率的波动会显著影响浅层边坡土体的抗剪强度,这是制约边坡稳定性的核心因素。土体的抗剪强度由黏聚力和内摩擦角共同决定,两者的变化均与含水率密切相关。当含水率处于合理范围时,土颗粒间的黏聚力较强,内摩擦角较大,土体能够承受一定的剪切力;随着含水率持续增加,水分会在土颗粒表面形成润滑膜,减小土颗粒间的摩擦力,导致内摩擦角减小,同时水分会稀释土体中的黏结物质,降低颗粒间的黏聚力。实际调查发现,农地周边的浅层边坡,由于灌溉导致土壤含水率频繁变化,土体抗剪强度波动较大,其边坡浅层滑塌的概率远高于林地边坡,这正是含水率变化对土体抗剪强度影响的直观体现。

土壤含水率的变化还会引发浅层边坡土体的应力状态改变,进一步加剧土体特性的劣化。当含水率升高时,土体孔隙中的水分无法及时排出,会产生孔隙水压力,孔隙水压力的增大将抵消土体的有效应力,导致土体的实际承载能力下降。在长期的含水率交替变化过程中,浅层边坡土体反复经历吸水膨胀、失水收缩的过程,会产生累计塑性变形,使土体内部出现微小裂隙,这些裂隙会不断扩展贯通,破坏土体的完整性。

3 含水率变化诱发浅层边坡失稳的过程特征

含水率变化诱发浅层边坡失稳的过程,始于水分在边坡浅层土体中的渗透累积,这一过程与实际降雨工况密切相关,尤其是连续降雨或久旱后的突发降雨,极易引发土体含水率的快速波动^[3]。水分通过土体孔隙逐步入渗,打破浅层边坡土体原有的水分平衡,初始阶段非饱和土体中的基质吸力会随着含水率增加而逐渐减小,原本紧密结合的土颗粒间出现水分润滑层,土体颗粒间的联结作用被削弱,使得浅层土体的物理力学性质开始发生细微变化,这是边坡失稳的初始酝酿阶段,从外观上难以察觉明显变形,但土体内部已出现稳定性衰减的迹象,类似黄土高原地区浅层边坡在降雨初期的隐蔽性变化。

随着含水率的持续升高,浅层边坡土体的抗剪强度会显著下降,黏聚力和内摩擦角均呈现递减趋势,这是诱发边坡失稳的核心环节。水分不断填充土体孔隙,导致孔隙水压力大幅上升,有效应力相应降低,土体的承载能力进一步弱化,部分渗透性较差的土层会形成局部饱和区,饱和土体易发生湿陷、软化,使得边坡浅层土体出现缓慢的蠕滑变形。实际工程中,公路路堑浅层边坡在持续降雨后,常出现坡肩部位的细微拉张裂缝,这正是含水率升高导致土体变形的直观表现,裂缝的出现又会加速水分入渗,形成恶性循环。

当含水率升高至临界状态,浅层边坡土体的抗剪强度已无法承受自身重力及坡面附加应力,失稳过程进入爆发阶段,这一过程具有突发性和快速性。饱和土体的自重显著增加,加上孔隙水压力的持续作用,土体颗粒间的联结彻底被破坏,原本缓慢的蠕滑变形迅速转变为整体滑动,坡体浅层土体沿潜在滑动面发生滑移、坍塌。这种现象在黄土梁峁沟壑地区尤为常见,强降雨后浅层边坡常会出现局部滑塌,滑塌土体多为浅层饱和黄土,滑塌范围与水分入渗深度基本一致,最终形成明显的坡体坍塌痕迹,造成坡面破坏,甚至影响周边设施安全。

4 不同含水率条件下浅层边坡稳定性差异研究

不同含水率条件下,浅层边坡稳定性差异显著,核心原因是含水率改变了土体物理力学性质。地质调查表明,干燥状态下浅层边坡稳定性最优。含水率较低时,土体颗粒排列紧密,黏聚力与内摩擦角较高,可有效抵抗下滑力,土体结构完整,不易出现变形、开裂等失稳迹象。干旱地区浅层边坡多处于这一状态,即使坡度略有起伏,也能长期稳定。低含水率使土体孔隙水压力小、有效应力大,抗剪强度满足稳定要求,不易发生整体滑动或局部坍塌。土壤含水率测量方法是允许沿着埋在土壤中的TDR金属探针检索水分分布。TDR测量土壤水分依赖于土体介电常数

与其体积含水率之间的关系。地面沉降由激光传感器监测，激光传感器安装在边坡的不同区域，光轴垂直于土壤表面。随着含水率升高，土体力学性能下降，稳定性随之降低。

当土壤含水率逐渐升高，浅层边坡的稳定性会随之下降，这种变化在降雨集中地区表现得尤为明显。随着水分不断渗入边坡土体，水分子会填充土体颗粒间的孔隙，削弱颗粒间的联结作用，导致土体黏聚力和内摩擦角逐步减小，抗剪强度明显降低。水分的渗入会增加土体自重，增大边坡下滑力，且孔隙水压力不断上升，有效应力相应减小，进一步加剧边坡失稳风险。例如，陕北黄土地区的浅层边坡，在降雨后含水率从低水平升至中等程度时，边坡表面常会出现细小裂缝，局部土体发生软化，若持续降雨导致含水率进一步升高，裂缝会不断扩展，最终引发小型浅层滑坡，这也是该区域降雨后滑坡灾害频发的主要原因之一。

当土壤含水率达到饱和状态时，浅层边坡的稳定性降至最低，极易发生失稳破坏。饱和状态下，土体孔隙被水分完全填充，孔隙水压力急剧增大，有效应力大幅减小，土体黏聚力和内摩擦角降至最低，抗剪强度几乎丧失，无法抵抗边坡自身重力产生的下滑力。地下水水位变化规律分析，为合理利用水资源提供重要技术支持。影响其变化的要素在具体的区域表现为一种水文要素或多种要素综合影响所致，现有资料显示，影响孔隙潜水地下水水位变化的最敏感的致变因子是降水要素，且地下水埋深与地下水水位成反比关系，降雨增大则埋深减小，降水量大时土壤含水补给充分，地下水水位增高，相反则地下水水位降低。实际场景中，持续暴雨、地下水水位上升等情况都会导致浅层边坡土体饱和，此时边坡土体呈软化状态，颗粒间联结力极度微弱，易发生整体滑动，且滑动速度较快、破坏范围较广。

5 基于含水率调控的浅层边坡失稳防控思路

土壤含水率变化是浅层边坡失稳的核心诱因，其防控关键在于对含水率的精准管控。应结合边坡岩土特性与现场水文条件，构建贴合工程实际的防控体系，从源头抑制含水率剧烈波动引发的失稳风险。浅层边坡土体的抗剪强度、基质吸力与含水率密切相关，含水率过高会导致土体孔隙充水、有效应力降低、基质吸力快速丧失，显著削弱土体抗剪能力，进而引发浅层滑移。防控工作必须将含水率控制在合理范围，同时兼顾措施的实用性与可操作性，满足公路、铁路等常规边坡工程需求。多雨地区可通过优化排水系统、设置排水构件减少雨水入渗，结合合理压实标准提升土体自身稳定性，为含水率管控奠定基础。

含水率管控须立足现场工况，针对边坡土体类型、坡度及周边水文环境采取差异化措施，实现浅层土体含水率动态调控，避免骤升骤降破坏边坡稳定。施工阶段应采用分层压实工艺，减小土体孔隙率、延缓雨水入渗，并严格按照最优含水率控制填料含水量，防止因含水率超标导致压实度不足，埋下后期失稳隐患。运营养护阶段可开展常态化含水率监测，当数据接近临界值时，及时采取人工晾晒、局部排水等简易措施，恢复基质吸力与土体力学强度，契合工程低成本、易实施的防控要求。

浅层边坡失稳宜构建“调控+防护+监测”三位一体协同防控架构，将含水率管控贯穿全过程。在含水率精准控制基础上，配合坡面防护构件，减轻雨水冲刷与入渗，保护表层土体结构，减缓含水率波动幅度。同步建立简易监测网络，实时掌握浅层土体含水率变化，结合坡面裂缝、鼓胀等外观巡查，提前识别失稳前兆并动态调整防控策略。工程应用中应根据边坡具体条件优化措施组合，兼顾经济性与长效性，通过全过程、精细化的含水率管控，有效遏制浅层边坡失稳，保障工程长期运营安全。

6 结语

浅层边坡稳定性受水文条件与土体特性共同制约，土壤含水率变化是主导其失稳演化的关键因子。水分入渗与干湿循环持续改变土体结构、抗剪强度及应力状态，推动边坡从内部劣化逐步走向滑移坍塌。本文系统揭示了含水率波动对边坡失稳的作用机制、过程特征与稳定性差异，明确了饱和状态下土体强度骤降是失稳爆发的核心诱因。以含水率精准调控为核心，结合排水、防护与动态监测，可为浅层边坡灾害预警与工程防治提供理论支撑。未来研究可结合现场监测与数值模拟，进一步量化含水率临界阈值，提升复杂工况下边坡灾害防控的科学性与实用性。

[参考文献]

- [1]高云飞,张凯,杜坤,等.采煤沉陷区地裂缝对土壤含水率的影响[J].天津师范大学学报(自然科学版),2024,44(01):62-68.
- [2]任永林,李光春,赵磊,等.不同土壤含水率变化对其热物性影响研究[J].中国水运,2022,22(16):116-118.
- [3]彭文栋.宁夏盐池气候与土壤含水率时空变化对修复退化草地的影响研究[J].宁夏农林科技,2021,62(04):34-39.

作者简介:

张徐(1994—),男,汉族,山西省运城市人,硕士研究生,研究方向:水工环地质。