

黄土地区降雨入渗引起的浅层滑坡形成机制研究

杨 浩 支光琴 何兴凤

四川省第六地质大队 四川 泸州 646000

【摘 要】：黄土地区具有特殊的结构性和强烈的水敏性，降雨入渗对其稳定性影响显著。本文通过对典型黄土坡地的降雨入渗过程进行分析，揭示了浅层滑坡的形成机制。研究表明，降雨使土体含水率显著上升，毛细水上升与渗流共同作用导致孔隙水压力增大，进而降低土体抗剪强度。当入渗深度超过临界滑动面时，浅层滑动体产生位移并逐渐失稳。通过数值模拟与现场观测结合的方法，本文探讨了不同降雨强度与历时下的坡体响应规律，为黄土地区滑坡预警及防治提供了理论依据。

【关键词】：黄土地区；降雨入渗；浅层滑坡；孔隙水压力；强度衰减

DOI:10.12417/2811-0528.26.01.026

引言

黄土地区广泛分布于中国西北与中部，是地质灾害高发带之一。受地貌特征与气候变化的双重影响，降雨诱发的浅层滑坡频繁发生，严重威胁区域安全与土地利用。黄土结构疏松、孔隙发育，对水分极为敏感，一旦降雨入渗，土体结构迅速软化并产生应力集中。浅层滑坡作为最常见的地表失稳形式，其发生机制尚需深入探讨。近年来，随着气候变化导致极端降雨事件增多，传统稳定性分析方法难以准确反映入渗对滑坡的动态影响。因此，从降雨入渗角度揭示黄土坡体失稳机理，不仅有助于解释滑坡的孕育过程，也为预测与防治提供新的科学思路。

1 黄土地区降雨入渗对坡体水文与力学特性的影响

黄土地区的降雨入渗过程对坡体的水文与力学特性具有显著影响。由于黄土具有特殊的结构性和大孔隙特征，当降雨渗入土体后，水分沿垂直方向迅速迁移并在局部形成湿润锋面。入渗使得原本处于不饱和状态的黄土逐渐趋向饱和，土体基质吸力明显减弱，孔隙水压力上升，破坏了原有的结构稳定性。随着降雨历时的延长，湿润锋逐步向下扩展，浅层黄土的含水率持续增加，毛细水上升带与重力渗流带相互作用，使土体产生非均质湿润区，这一变化直接改变了坡体内部的应力分布。

在降雨过程中，土体结构中的微裂隙逐渐被水分充填，胶结颗粒间的静电吸引力与黏聚力显著降低。颗粒间的接触状态从点接触转变为面接触，导致结构性破坏和强度衰减。特别是在具有强结构性和大孔隙比的黄土中，降雨引起的吸力消散过程更为敏感，一旦达到临界含水率，土体剪切强度迅速下降。此时，坡体表层的抗滑力减弱，滑动面上的有效应力减小，易形成浅层滑动带。

入渗水在坡体内部的分布具有明显的不均匀性，受地形坡

度、植被覆盖及渗透系数差异影响，局部区域会形成滞水带或潜水面。滞水的存在增加了坡体的自重，同时在孔隙中产生正孔压，削弱了土体的抗剪能力。渗流作用下，细颗粒易被携带迁移，形成孔隙膨胀与局部塌陷，使黄土的微观结构进一步破坏。水分的周期性入渗还会引起湿胀干缩效应，导致坡体反复变形，为后续滑坡失稳创造条件。从整体上看，降雨入渗改变了黄土坡体的水分迁移、吸力平衡及力学响应过程，使原本稳定的浅层土体逐步向临界状态演化。土体的渗透系数、孔隙分布与降雨强度共同决定了入渗速率与深度，而这些因素的耦合作用，正是黄土地区浅层滑坡孕育的关键内在机制。

2 降雨入渗诱发浅层滑坡的形成机理分析

降雨入渗诱发浅层滑坡的形成过程是一个由水文、力学与地质条件共同耦合的复杂演化体系。当降雨持续作用于黄土坡面时，地表水逐渐渗入土体内部，形成垂向与侧向渗流。入渗过程使得浅层土体的含水率不断上升，基质吸力逐步消散，土体从不饱和状态向饱和状态转变。随着负孔隙水压力的降低，土体的有效应力显著减少，导致抗剪强度下降。局部区域在应力集中和孔压积聚的共同作用下，形成潜在滑动面。坡体上部重力与下部抗力之间的平衡被打破，浅层滑坡逐渐进入加速变形阶段。

黄土中广泛存在的垂直大孔隙与微裂隙为入渗水提供了快速通道，使得降雨能够迅速穿透表层，进入结构疏松的黄土层。当降雨强度超过渗透能力时，地表径流与入渗水共存，局部形成渗流聚集带。该区域孔隙水压力迅速增大，削弱了土体间的摩擦力与黏聚力。黄土的结构性破坏导致原有的骨架失稳，颗粒间重新排列，使剪应变集中在浅层范围内，逐步演化为滑动带。滑动带上方的土体受重力影响沿坡面产生剪切位移，而下伏层因强度衰减难以支撑上部荷载，形成典型的浅层滑动破坏模式。

在降雨历时较长或强降雨事件中，渗透前锋持续向下发

展,浅层水分迁移引起应力重分布。坡体内的渗流压力与重力场叠加后,使局部区域形成不稳定区。由于黄土的渗透系数随含水率增大而变化,入渗水在局部区域滞留,形成临时饱和带或潜水面。潜水面上升后,滑动带的孔隙压力持续上升,剪切面有效应力减小至临界值,浅层滑坡被触发。与此同时,渗流的动力作用促使细颗粒迁移,产生土体内部空隙扩大与结构松散,增强了滑动趋势。

坡体地形条件在形成机理中起到关键作用。坡度较大、汇流条件良好的区域更容易积聚渗流能量,坡脚处的排水不畅加剧了孔隙水的堆积效应。降雨的空间分布不均还会造成局部湿陷差异,导致应力集中与裂隙扩展。植被覆盖度低或根系浅薄的地段,其固土能力较弱,土体更易在入渗过程中发生剥落与浅层滑移。通过降雨入渗引起的水分迁移、孔压变化与强度衰减三者的连续耦合,黄土坡体从初始稳定状态逐步演化为临界失稳,最终形成浅层滑坡。

3 降雨型滑坡稳定性变化规律与防治启示

降雨型滑坡的稳定性变化呈现出明显的阶段性与动态演化特征。降雨开始后,坡体表层的含水率迅速上升,基质吸力减小,使浅层土体强度出现初步衰减。随着入渗深度增加,水分在坡体内部的迁移导致孔隙水压力逐步积聚,当渗透前锋接近潜在滑动面时,剪应力与抗剪强度的比值持续增大,稳定系数下降至临界水平。降雨历时越长、强度越大,饱和区扩展速度越快,导致坡体整体失稳的可能性显著提高。在这一过程中,渗流场、应力场与变形场相互作用,形成由湿润扩散到滑动破坏的渐变过程。

参考文献:

- [1] 王海峰,刘志强.黄土地区降雨入渗特性及其对坡体稳定性的影响研究[J].岩土工程学报,2022,44(8):1523-1535.
- [2] 陈俊豪,马玉洁.降雨诱发浅层滑坡形成机制与稳定性分析[J].水土保持学报,2023,37(5):87-96.
- [3] 郭建华,张晓蕾.不同降雨条件下黄土坡体渗流场与应力场耦合特性[J].地质科学,2021,56(4):742-753.

在降雨作用的不同阶段,坡体稳定性呈非线性变化。短时强降雨引起的快速入渗会导致浅层土体突发失稳,而长时弱降雨则可能引发延迟型滑坡。随着孔压的上升,黄土结构发生不可逆转的微观破坏,导致应力重新分配。坡脚区域因渗流集中而产生附加剪应力,成为滑动启动的关键部位。降雨停止后,孔压消散速度缓慢,坡体往往仍处于亚稳定状态,一旦再次遭遇降雨或外部扰动,极易出现二次滑动或局部坍塌。

降雨型滑坡的防治应依据其稳定性变化规律,采用水文控制与工程加固相结合的手段。控制坡体含水率是关键环节,通过坡面排水、截水沟和渗沟等措施减少入渗量,可有效抑制孔压累积。对易形成潜水面的地段,应设置地下排水系统,降低饱和带水位。植被重建能够增强地表截流与蒸腾作用,改善土体结构稳定性。对于变形活跃的黄土坡体,可采用抗滑桩、锚杆及抗剪挡墙等支挡结构,提升抗滑阻力。监测方面,应布设孔隙水压力计与土体位移计,实时掌握坡体响应状态。通过对降雨强度、历时与坡体参数的综合分析,可建立区域性降雨阈值预警模型,实现对降雨型滑坡的动态预测与风险控制,从而在灾害孕育早期阶段有效降低失稳发生概率。

4 结语

降雨入渗对黄土地区浅层滑坡的诱发具有显著的控制作用,其形成过程受水文、力学及地质条件的多重耦合作用影响。通过分析降雨入渗对坡体结构与稳定性的影响机理,可更深入理解滑坡的孕育与演化过程。掌握稳定性变化规律并结合科学的监测与防治措施,是减少黄土滑坡灾害风险、保障区域生态与工程安全的重要途径。