

降雨入渗作用下岩土边坡失稳机理与治理措施分析

胡兴繁

中国冶金地质总局内蒙古地质勘查院 内蒙 呼和浩特 010000

摘要: 降雨入渗是雨水向岩土体渗透迁移的复杂过程,分初渗、稳渗、饱和三个阶段,受多种因素影响。其会引发渗流场变化致受力失衡、岩土体力学性质劣化、结构完整性破坏,威胁边坡稳定。治理核心原则为阻断入渗减少饱和、优化受力恢复平衡、强化性能提升抗失稳能力。具体措施包括坡面防护阻断表面入渗、排水加速水分排出、岩土体加固提升抗失稳能力。通过这些措施,可有效应对降雨入渗对边坡的不利影响,保障边坡稳定。

关键词: 降雨入渗; 岩土边坡; 失稳机理; 治理措施

引言: 在自然环境与工程建设中,降雨入渗对岩土边坡稳定性的影响至关重要。降雨入渗是一个复杂动态过程,受岩土体渗透性能、降雨强度等多种因素制约,可划分为初渗、稳渗和饱和三个阶段。这一过程会引发渗流场变化,导致岩土体受力失衡,还会使岩土体力学性质劣化、结构完整性被破坏,进而威胁边坡稳定。深入了解降雨入渗作用下岩土边坡的失稳机理,明确治理的核心原则,并采取有效的治理措施,对于保障边坡稳定、维护周边环境和工程安全意义重大。本文将围绕降雨入渗过程、失稳机理、治理原则及具体措施展开详细探讨。

1 降雨入渗的基本过程

降雨入渗是雨水从坡面逐步向岩土体内部渗透、迁移的复杂动态过程,其发展进程受多种因素制约,主要包括岩土体的渗透性能、降雨强度大小、降雨持续时长以及边坡坡面的具体形态等,整体可划分为三个紧密相连的阶段。(1)初渗阶段处于降雨初期,此时岩土体表面处于干燥状态,孔隙度较大,为雨水渗透提供了良好通道。在重力作用下,雨水迅速渗入岩土体内部,入渗速率较快,且入渗量会随着降雨时长的增加而快速上升。(2)稳渗阶段紧随其后,随着降雨持续,岩土体含水量不断升高,孔隙逐渐被水分填充,导致入渗阻力持续增大。此时,入渗速率逐渐趋于稳定,入渗量与降雨强度达到一种动态平衡状态。当入渗量达到一定程度后,多余雨水无法继续渗入,便会在坡面形成径流。(3)饱和阶段则是在降雨持续时间长、强度大的情况下出现。岩土体内部水分不断累积,孔隙水无法及时排出,使得岩土体逐渐达到饱和状态。在此过程中,入渗速率进一步降低,饱和区从岩土体表层逐渐向深层扩展。这一阶段为边坡失稳埋下了隐患。在整个入渗过程中,岩土体的孔隙结构与颗粒级配对入渗效率起着关键

作用。孔隙越大、连通性越好,雨水渗透就越顺畅,入渗速率越快,岩土体达到饱和和所需时间越短,边坡失稳的风险也就越高^[1]。

2 降雨入渗作用下岩土边坡失稳机理

2.1 渗流场变化引发的受力失衡

降雨入渗前,岩土边坡内部的孔隙水压力处于相对稳定状态,岩土体主要承受自身重力、有效应力以及坡面摩擦力,整体处于平衡状态。降雨入渗过程中,雨水不断填充岩土体孔隙,导致孔隙水压力逐渐升高,有效应力随之减小。根据有效应力原理,岩土体的抗剪强度与有效应力正相关,有效应力的降低会直接削弱岩土体的抗剪能力。同时,入渗过程中形成的渗流会产生渗流力,渗流力的方向与水流方向一致,当渗流力达到一定强度时,会对岩土体颗粒产生推动作用,破坏岩土体颗粒间的联结力,导致岩土体发生蠕动、位移。此外,当岩土体达到饱和状态后,饱和区与非饱和区形成明显的分界面,分界面处的孔隙水压力突变,会产生附加应力,进一步加剧边坡的受力失衡,为边坡失稳提供动力条件。

2.2 岩土体力学性质的劣化

岩土体的力学性质是决定边坡稳定性的核心因素,降雨入渗会从多个方面导致岩土体力学性质劣化,主要表现为抗剪强度降低、压缩性增大以及黏聚力减弱。对于黏性土边坡,降雨入渗后,水分会渗入土颗粒间的空隙,破坏土颗粒间的毛细联结和黏聚力,导致土颗粒间距增大,土体软化,抗剪强度显著下降;同时,水分的渗入会使黏性土发生膨胀,体积增大,产生膨胀压力,进一步破坏岩土体结构,降低其力学性能。对于砂性土边坡,降雨入渗会填充砂颗粒间的孔隙,减小颗粒间的摩擦力,导致砂性土的抗剪强度降低,且砂性土渗透性较强,雨水快速渗入后易形成管涌、流砂现象,加速边

坡失稳。对于含裂隙的岩土体，雨水会沿裂隙渗入内部，使裂隙壁软化、崩解，扩大裂隙规模，进一步降低岩土体的整体性和力学强度^[2]。

2.3 岩土体结构完整性的破坏

岩土体的结构完整性是保障边坡稳定的重要基础，降雨入渗会通过物理、化学作用破坏岩土体的结构，导致其完整性下降。从物理作用来看，降雨入渗过程中，雨水的渗透会对岩土体颗粒产生冲刷、侵蚀作用，带走细小颗粒，导致岩土体孔隙增大、结构松散；同时，雨水的反复入渗与蒸发会使岩土体发生干湿循环，产生收缩、膨胀变形，进而产生新的裂隙，破坏岩土体的连续性。从化学作用来看，雨水会溶解岩土体中的可溶性矿物质，导致土颗粒间的联结力减弱，结构松散；对于含有易软化矿物的岩土体，雨水的渗入会使矿物发生水化反应，导致岩土体软化、崩解，进一步破坏其结构完整性。岩土体结构的破坏会导致其承载力下降，无法承受边坡自身重力和渗流力的作用，最终引发边坡失稳。

3 降雨入渗作用下岩土边坡治理的核心原则

3.1 阻断降雨入渗，减少岩土体饱和

在降雨入渗这一复杂作用过程下，岩土边坡治理需遵循的首要核心原则，是切实有效地减少雨水进入岩土体内部。雨水入渗会使岩土体内部孔隙水压力显著升高，进而导致岩土体的抗剪强度等力学性质发生劣化，大大增加边坡失稳的可能性。因此，阻断入渗通道、降低岩土体饱和程度成为治理工作的关键所在。在坡面防护层面，可依据现场实际情况，采用植被防护或工程防护手段，在坡面构建起一层坚固的保护层，以此减少雨水对坡面的直接冲刷以及入渗量。同时，科学合理的排水措施不可或缺。在坡面设置截水沟、排水沟等排水设施，能够合理引导坡面水流，减少坡面径流的产生，避免雨水长时间在坡面滞留。此外，在岩土体内部设置排水盲沟、排水孔等内部排水设施，可加速岩土体内部孔隙水的排出。通过这些综合措施，维持岩土体处于非饱和状态，保障其力学性能稳定，从源头上有效控制边坡失稳的风险，确保岩土边坡的安全与稳定^[3]。

3.2 优化边坡受力，恢复平衡状态

在降雨入渗这一复杂作用下，优化边坡受力结构并恢复其原有的平衡状态，是保障岩土边坡稳定性的关键原则。边坡的稳定性本质上是由其受力状态所决定的，一旦下滑力超过抗滑力，边坡便会不可避免地出现位移、坍塌等失稳现象，进而对周边环境和工程安全构成严重威胁。为了有效优化边坡受力，需从调整边坡形态与增强坡面支撑两方面入手。在调整边坡形态上，通过

合理减小边坡自重、降低坡面坡度，能够显著减小下滑力，从源头上降低边坡失稳的风险。而在增强坡面支撑方面，增设如锚杆（索）框架、挡土墙等支撑结构至关重要。这些结构可有效增强边坡的抗滑能力，有力抵消降雨入渗产生的渗流力以及原本存在的下滑力。通过上述综合措施的实施，边坡的受力结构将更加科学合理，能够恢复并维持平衡状态，即便在降雨入渗等不利条件下，也能确保边坡的长期稳定。

3.3 强化岩土体性能，提升抗失稳能力

在降雨入渗的持续影响下，岩土体常出现力学性质劣化、结构松散等状况，这极大地威胁着边坡的稳定性。在此情形下，强化岩土体性能、提升其抗失稳能力成为治理岩土边坡的核心原则之一。岩土体的抗剪强度、黏聚力和承载力等关键力学性能指标，犹如边坡稳定性的“基石”，直接决定着边坡在各种工况下的安全程度。一旦这些性能下降，边坡失稳的风险便会大幅增加。为有效提升岩土体性能，必须依据岩土体的具体类型和性质，精准选用合理的改良技术。注浆加固是一种行之有效的办法，通过向岩土体的孔隙和裂隙中注入特定浆液，待浆液凝固后，能显著增强岩土体的黏聚力和抗剪强度，使其结构更加紧密。换填加固则适用于表层岩土体质量较差的情况，将劣质岩土体挖除后，换填强度高、渗透性好的材料，改善岩土体整体性能。通过这些针对性措施，恢复或提升岩土体的力学性能，增强其结构完整性，从根本上筑牢边坡稳定的防线，保障其长期稳定^[4]。

4 降雨入渗作用下岩土边坡的具体治理措施

4.1 坡面防护措施：阻断表面入渗

坡面防护是应对降雨入渗导致岩土边坡失稳的重要手段，其核心在于减少雨水对坡面的直接冲刷，有效阻断雨水在坡面的入渗，同时保护坡面岩土体，防止其因风化、崩解而降低稳定性。常用的坡面防护措施主要分为植被防护与工程防护两大类。（1）植被防护适用于坡度较缓、岩土体稳定性良好的边坡。通过在坡面种植耐旱且固土能力强的植物，植物根系能深入岩土体，起到固定作用，增强坡面土体的抗剪强度。同时，植物冠层可截留部分雨水，减少坡面径流的形成，进而降低雨水入渗量。（2）工程防护则更具针对性和强度。喷混凝土防护能在坡面迅速形成一层致密的防护层，有效阻断雨水入渗路径，还可增强坡面岩土体的整体性，提高其抗变形能力。锚杆框架防护利用锚杆将框架固定在坡面上，框架内铺设防护材料，既能防止坡面被雨水冲刷，又能通过锚杆提供拉力，增强边坡的抗滑能力。浆砌片

石护坡适用于坡度较陡、降雨强度大的边坡，它可抵御雨水的强烈冲刷，防止岩土体崩解，减少雨水入渗，保障边坡的稳定。

4.2 排水措施：加速水分排出

排水措施对于维护降雨入渗作用下岩土边坡的稳定至关重要，其核心在于加速岩土体内部水分的排出，以此降低孔隙水压力，缩减岩土体的饱和范围，进而恢复岩土体的有效应力与力学性能，增强边坡的抗失稳能力。（1）排水措施主要分为坡面排水和内部排水两大类。坡面排水旨在迅速排出坡面径流，防止雨水长时间在坡面滞留并渗入岩土体。常见的坡面排水设施有截水沟、排水沟和急流槽等。截水沟通常设置在边坡顶部，能有效拦截坡顶的雨水，避免其流入坡面增加入渗风险；排水沟沿着坡面坡度合理布置，可将坡面径流有序汇集并排出边坡范围；急流槽则适用于坡度较陡的坡面，它能加速径流的排出速度，防止水流对坡面造成冲刷破坏。（2）内部排水主要针对排出岩土体内部的孔隙水，降低孔隙水压力。常用的内部排水设施包括排水盲沟、排水孔和渗沟等。排水盲沟设置在岩土体内部的饱和区，可将孔隙水有效汇集并排出；排水孔垂直或倾斜插入岩土体内部直至饱和区，加速水分排出；渗沟则用于拦截岩土体内部的地下水，减少地下水对边坡的不利影响，降低孔隙水压力^[5]。

4.3 岩土体加固措施：提升抗失稳能力

岩土体加固措施是应对降雨入渗导致岩土边坡失稳的关键手段，旨在改良岩土体的固有性质，增强其结构完整性与力学性能，进而提升边坡的抗滑、抗崩解能力，尤其适用于岩土体力学性质欠佳、结构松散的边坡。（1）常用的加固措施丰富多样。注浆加固是向岩土体的孔隙与裂隙中注入特定浆液，待浆液凝固后，与周围岩土体紧密结合成一个整体，显著增强岩土体的黏聚力和抗剪强度。不仅如此，它还能有效堵塞雨水入渗的

通道，减少雨水对边坡的侵蚀，降低失稳风险。（2）锚杆（索）加固则是将锚杆（索）精准插入岩土体深部的稳定层，并施加预应力，使边坡岩土体与稳定层紧密联结，形成一个稳固的整体，大幅增强边坡的抗滑能力，有效抵消下滑力和渗流带来的不利影响。（3）换填加固主要针对表层岩土体松散、力学性质极差的边坡。通过挖除表层劣质岩土体，换填强度高、渗透性良好的材料，从根本上改善岩土体性质，提升边坡稳定性，同时减少雨水入渗对深层岩土体的潜在危害。

结束语

降雨入渗对岩土边坡稳定性的影响是多方面且复杂的。从降雨入渗的基本过程，到由此引发的边坡失稳机理，再到针对性的治理原则与具体措施，每一个环节都紧密相连、不可或缺。通过阻断降雨入渗、优化边坡受力、强化岩土体性能以及采取坡面防护、排水、加固等具体措施，能够有效降低降雨入渗对边坡稳定性的不利影响，保障边坡在各种工况下的安全稳定。在未来的工程建设与环境保护中，我们应充分重视降雨入渗这一因素，不断深入研究，优化治理方案，以更好地应对降雨入渗带来的挑战，实现边坡的长期稳定与安全。

参考文献

- [1]常俊松,李浩然,黄建民,王鑫磊,官翔天.重载铁路黄土边坡降雨失稳机制与应急防护措施研究[J].铁道标准设计,2025,69(5):79-87.
- [2]赵保忠.岩土工程中高填方边坡的稳定性分析与治理措施[J].中国金属通报,2025(4):231-233.
- [3]孙章锐,刘辉.强风化页岩边坡渗流作用失稳机理及控制措施[J].交通科技,2025(4):14-19.
- [4]高继章.降雨入渗下矿山破裂结构岩质边坡滑坡成灾机理分析[J].矿产勘查,2025,16(9):2178-2184.
- [5]谢远耀,宋运超.某复杂泥岩高边坡失稳机制分析及治理研究[J].西部交通科技,2025(6):71-74.