

降雨入渗对黄土边坡失稳的影响机制分析

张振国

山西省地质建设工程有限公司 山西 太原 030009

摘要: 本文聚焦降雨入渗对黄土边坡失稳的影响机制。阐述了降雨入渗过程,包括基本理论与数值模拟;分析降雨对黄土物理力学性质的影响,如含水量、抗剪强度和压缩性;探讨孔隙水压力变化规律及其对边坡稳定性的影响;最后介绍边坡稳定性分析方法,总结失稳模式与临界降雨条件。旨在为黄土边坡灾害预警与防控提供理论依据。

关键词: 降雨入渗;黄土边坡;失稳机制;孔隙水压力;土体强度

引言:黄土地区地质灾害频发,降雨入渗是引发黄土边坡失稳的关键因素。黄土特殊的多孔骨架结构,使其降雨入渗过程复杂,且会改变黄土物理力学性质,影响边坡稳定性。深入研究降雨入渗对黄土边坡失稳的影响机制,明确其作用过程与规律,对预防边坡灾害、保障工程安全意义重大,能为相关领域研究与实践提供重要参考。

1 降雨入渗过程分析

1.1 降雨入渗的基本理论

降雨入渗是指大气降雨从地表渗入土体内部的物理过程,是水文循环与岩土工程领域的核心研究内容之一,其本质是水在重力、毛细力、吸附力等多力共同作用下,在土体孔隙中渗透、迁移的动态过程。该过程主要分为初渗阶段、稳渗阶段两个核心阶段,初渗阶段土壤干燥、孔隙度大,入渗速率较快且随时间快速下降;稳渗阶段土壤含水量逐渐接近饱和,入渗速率趋于稳定,此时入渗量主要由土体渗透能力决定。根据入渗理论,当降雨强度小于稳渗速率时,降雨可全部渗入土体;当降雨强度大于稳渗速率时,多余雨水会形成地表径流^[1]。黄土因具有特殊的多孔骨架结构,其入渗过程还会受到孔隙连通性、裂隙发育程度的影响,与普通粘性土相比,初始入渗速率更高,但饱和后稳渗速率显著降低,这也是黄土地区降雨入渗易引发地质灾害的重要原因之一,同时入渗过程还会改变土体内部水分分布,为后续边坡失稳埋下隐患。

1.2 降雨入渗的数值模拟

降雨入渗的数值模拟是通过建立数学模型,结合土体物理参数与气象条件,模拟降雨入渗过程中水分迁移规律、含水量分布及浸润锋推进特征的有效手段,已广泛应用于岩土工程、水文地质等领域。目前常用的数值模拟方法主要基于饱和-非饱和渗流理论,核心模型包括有限差分法、有限元法等,常用软件有FLAC3D、Geostudio、ANSYS等。模拟过程中,需先通过室内试验获取土体渗

透系数、孔隙度、持水曲线等关键参数,再结合现场降雨数据设定边界条件,构建与实际工况一致的数值模型。模拟结果可直观呈现不同降雨时长、强度下,土体内部含水量的动态变化、浸润锋的推进速度,以及孔隙水压力的分布特征,能够有效预测降雨入渗的深度与范围。

2 降雨对黄土物理力学性质的影响

2.1 降雨对黄土含水量的影响

降雨是影响黄土含水量的最主要外部因素,其对黄土含水量的影响具有明显的分层性、时效性和空间差异性,直接改变黄土的物理状态。降雨入渗过程中,水分从地表逐渐向深层渗透,形成自上而下的含水量梯度,表层黄土受降雨影响最显著,含水量提升最快,深层黄土因入渗阻力大,含水量变化较为缓慢。短时间暴雨会使表层黄土含水量快速攀升至饱和,而持续小雨则会使水分缓慢渗透,含水量均匀提升,且入渗深度更深。黄土高原地区降雨稀少但集中,近地表黄土含水量随埋深增加先上升后下降,受降雨补给影响显著,到一定深度后,因降雨入渗量减少,含水量逐渐趋于稳定,干密度随之增大。坡体不同部位含水量差异明显,坡顶、坡肩入渗量大于坡面,含水量更高,而坡脚因径流汇集,含水量也相对较高,这种含水量分布不均会进一步加剧黄土物理力学性质的差异,影响边坡稳定性。

2.2 降雨对黄土抗剪强度的影响

抗剪强度是黄土抵抗剪切破坏的核心力学指标,降雨通过改变黄土含水量,进而显著降低其抗剪强度,这是降雨诱发黄土边坡失稳的关键原因。黄土的抗剪强度主要由内摩擦力和粘聚力构成,两者均随含水量的增加而呈现下降趋势。当降雨入渗使黄土含水量升高时,水分会填充土体孔隙,削弱颗粒间的摩擦力和粘聚力,使土体颗粒间的联结作用减弱,抗剪强度随之降低;当含水量达到饱和状态时,水分会在颗粒间形成水膜,进一步减小颗粒间的作用力,抗剪强度降至最低^[2]。研究表明,

黄土含水量每增加10%，抗剪强度可降低20%~30%，且湿陷性黄土在含水量增加后，会发生湿陷变形，进一步破坏土体结构，导致抗剪强度急剧下降。

2.3 降雨对黄土压缩性的影响

降雨入渗会显著改变黄土的压缩性，主要表现为含水量增加导致黄土压缩性增强、沉降量增大，这与黄土的特殊结构和水理性质密切相关。自然状态下，黄土含水量较低，颗粒间联结紧密，压缩性较弱，沉降量较小，其压缩性与低压缩性粘土差别不大，但抗水性较弱。当降雨入渗使含水量升高时，水分会软化黄土颗粒，破坏颗粒间的胶结作用，使土体结构变得松散，孔隙度增大，在外部荷载作用下易发生压缩变形，压缩系数增大、压缩模量减小，压缩性显著增强。部分浅表自重湿陷黄土在降雨入渗补给下，含水量不断增加，湿陷能力降低，但可压缩能力明显增强，接近失稳极限，此时少量加湿或加压均会引起明显变形。另外，降雨入渗深度不同，黄土压缩性的变化也存在差异，表层饱和黄土压缩性远大于深层非饱和黄土，这种压缩性的差异会导致坡体不均匀沉降，进一步破坏坡体结构，加剧边坡失稳风险。

3 降雨入渗下黄土边坡的孔隙水压力变化

3.1 孔隙水压力的基本概念与测量方法

孔隙水压力是指土体孔隙中水分产生的压力，是影响黄土边坡稳定性的核心力学参数，分为饱和区孔隙水压力和非饱和区孔隙水压力（基质吸力），前者为正压力，后者为负压力。其大小与土体含水量、渗透条件密切相关，直接影响土体有效应力，根据太沙基有效应力原理，有效应力等于总应力减去孔隙水压力，孔隙水压力升高会导致有效应力减小，削弱土体抗剪强度。孔隙水压力的测量方法主要分为室内试验和现场监测两类，室内常用三轴试验仪、压力板仪测量，可获取不同含水量、应力状态下的孔隙水压力数据；现场监测则主要采用测压计、张力计等仪器，其中测压计用于测量饱和区孔隙水压力，张力计用于测量非饱和区基质吸力。现场监测时，需将仪器埋设于坡体不同深度、不同部位，实时采集孔隙水压力数据，结合降雨情况，分析其动态变化规律，为边坡稳定性评价和灾害预警提供数据支撑^[3]。

3.2 降雨入渗过程中孔隙水压力的动态变化

降雨入渗过程中，黄土边坡孔隙水压力呈现明显的动态变化特征，整体趋势为从初始稳定状态逐渐升高，最终趋于稳定，变化过程与降雨时长、强度及坡体结构密切相关。降雨初期，坡体处于非饱和状态，孔隙水压力为负（基质吸力），此时降雨入渗使土体含水量增加，基质吸力逐渐减小，孔隙水压力缓慢升高；随着降雨持续，

水分不断向深层渗透，浸润锋逐渐下移，当浸润锋到达监测点时，孔隙水压力由负转正，且快速升高；当坡体达到饱和状态后，孔隙水压力趋于稳定，不再明显变化。孔隙水压力的变化存在空间差异性，坡顶、坡肩入渗速度快，孔隙水压力升高速度高于坡面和坡脚；深层土体孔隙水压力升高速度慢于表层，但稳定后的数值更高。强降雨条件下，孔隙水压力会出现突变式升高，尤其是在裂隙发育区域，水分快速渗透，易形成局部高孔隙水压力区，加剧坡体失稳风险。

3.3 孔隙水压力变化对边坡稳定性的影响

孔隙水压力的变化是降雨入渗诱发黄土边坡失稳的核心诱因，其通过改变土体有效应力、抗剪强度及坡体受力状态，间接影响边坡稳定性。一方面，孔隙水压力升高会直接抵消土体有效应力，根据有效应力原理，有效应力减小会导致土体抗剪强度显著降低，当抗剪强度不足以抵抗坡体自重及其他外力时，边坡易发生失稳破坏。另一方面，孔隙水压力的空间分布不均会导致坡体内部应力分布失衡，形成应力集中区域，尤其是在坡脚、裂隙发育部位，高孔隙水压力会使该区域土体强度急剧下降，成为坡体失稳的薄弱环节。另外，孔隙水压力升高会使土体含水量增加，引发黄土湿陷、软化，进一步破坏土体结构，降低坡体整体稳定性；当孔隙水压力达到一定数值时，会推动坡体产生位移，随着位移不断累积，最终导致边坡滑坡、坍塌。同时，孔隙水压力的动态变化还能反映坡体内部水分迁移规律，可作为边坡失稳的预警指标。

4 降雨入渗下黄土边坡稳定性分析

4.1 边坡稳定性分析方法概述

降雨入渗下黄土边坡稳定性分析是预防边坡灾害、保障工程安全的核心工作，目前常用的分析方法主要分为定性分析、定量分析和模型试验三大类，各类方法各有优势，实际工程中常结合使用。定性分析方法主要基于现场勘察，通过分析坡体地形地貌、黄土性质、降雨条件、裂隙发育情况等，结合历史滑坡案例，直观判断边坡稳定性等级，常用方法有自然历史分析法、工程类比法，具有操作简便、成本低的优势，适用于边坡初步评估。定量分析方法通过建立力学模型，计算坡体安全系数，量化边坡失稳风险，是目前应用最广泛的方法，主要包括极限平衡法、数值模拟法等。模型试验方法通过构建缩尺模型，模拟降雨入渗过程，观察坡体失稳过程和规律，验证定性、定量分析结果的准确性，常用的有室内模型试验和现场大型模型试验。随着技术发展，无人机监测、雷达监测等新技术也逐渐应用于边坡稳定

性分析,实现了坡体动态监测与实时预警。

4.2 基于极限平衡法的边坡稳定性分析

极限平衡法是降雨入渗下黄土边坡稳定性定量分析的经典方法,其核心原理是假设坡体沿潜在滑动面发生剪切破坏,通过建立滑动面的静力平衡方程,计算坡体抗滑力矩与滑动力矩的比值(安全系数),判断边坡稳定性,安全系数大于1时边坡稳定,小于1时边坡失稳。该方法将复杂坡体简化为刚体模型,忽略土体变形,计算简便、适用性强,常用的具体方法有瑞典圆弧法、毕肖普法、简布法等。在降雨入渗工况下,需考虑孔隙水压力的影响,通过有效应力原理修正抗剪强度参数,使计算结果更贴合实际。例如,瑞典圆弧法假设滑动面为圆弧,忽略土条间作用力,计算简便但精度较低;毕肖普法引入土条间法向力平衡条件,精度更高,适用于非均质黄土边坡。实际应用中,需结合坡体结构、降雨条件,选择合适的计算方法和滑动面形式,确保分析结果的准确性,为边坡治理提供依据。

4.3 基于数值模拟法的边坡稳定性分析

基于数值模拟法的黄土边坡稳定性分析,是通过构建与实际坡体一致的数值模型,模拟降雨入渗过程中坡体应力场、位移场、孔隙水压力场的变化,进而评价边坡稳定性,弥补了极限平衡法忽略土体变形的不足。该方法基于饱和-非饱和渗流理论和土体本构关系,常用的数值方法有有限差分法、有限元法,常用软件有FLAC3D、Geostudio、ANSYS等。分析过程中,首先通过室内试验获取黄土渗透系数、抗剪强度、孔隙度等参数,再结合现场降雨数据、坡体几何参数,设定边界条件,构建数值模型;随后模拟降雨入渗过程,分析不同降雨时长、强度下,坡体孔隙水压力、应力、位移的动态变化;最后通过强度折减法计算坡体安全系数,判断边坡稳定性。该方法可直观呈现坡体内部破坏过程,预测潜在滑动面位置,为边坡失稳预警和治理方案设计提供精准的理论支撑,广泛应用于复杂黄土边坡工程。

4.4 黄土边坡失稳模式与临界降雨条件

降雨入渗下黄土边坡失稳模式具有明显的规律性,主要分为滑坡、坍塌、泻溜三种类型,不同失稳模式的形成机制与坡体结构、降雨条件密切相关^[4]。滑坡是最常见的失稳模式,多发生于坡度较缓、厚度较大的黄土边坡,降雨入渗使土体饱和、抗剪强度降低,坡体沿潜在滑动面整体下滑,分为圆弧型、平面型两种滑动形式;坍塌多发生于陡坡、坡肩部位,因降雨入渗导致表层黄土软化、自重增加,发生突发性坍塌破坏;泻溜则是表层黄土受降雨冲刷、软化后,呈片状、粒状顺坡滑落,多发生于坡面裸露、植被覆盖率低的边坡。临界降雨条件是指导致黄土边坡失稳的最小降雨强度和降雨时长,其大小与黄土性质、坡体坡度、孔隙结构密切相关,黄土渗透性越强、坡度越陡,临界降雨强度越小、时长越短。通过现场监测和数值模拟,可确定不同类型黄土边坡的临界降雨条件,为边坡灾害预警提供量化指标,指导边坡防控工作的开展。

结束语

降雨入渗对黄土边坡失稳影响显著,涉及入渗过程、土体性质改变、孔隙水压力变化及稳定性分析等多方面。明确其影响机制,有助于准确预测边坡失稳风险。未来,需进一步结合新技术,深入研究不同条件下黄土边坡失稳规律,完善灾害预警体系,为黄土地区工程建设与灾害防治提供更科学有效的指导,保障人民生命财产安全。

参考文献

- [1]常俊松,李浩然,黄建民,等.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]孟振江,曹一迪,康尘云,等.降雨促发黄土滑坡的启动机制模拟[J].地球科学与环境学报,2023,45(3):474-484.
- [3]陈林万,裴向军,张晓超,等.不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究[J].水文地质工程地质,2022,49(2):137-147.
- [4]白雪亮,王汉勋,张彬,等.降雨入渗条件下非饱和黄土边坡稳定性分析研究[J].西北水电,2025(6):102-109.