

基于数值模拟的水文地质条件对边坡稳定性分析

李玥蓬 李浩然

河北省地质矿产勘查开发局第九地质大队 河北 邢台 054000

摘要: 本文旨在探讨水文地质条件对边坡稳定性的影响,通过数值模拟的方法进行分析。边坡稳定性是岩土工程领域的重要研究课题,尤其在涉及水文地质条件复杂的地区,如河流沿岸、水库周边及地下水丰富的区域,边坡稳定性问题尤为突出。本文综述了当前数值模拟技术在边坡稳定性分析中的应用,重点分析了水文地质条件(如地下水位、渗透系数等)对边坡稳定性的影响,并提出了相应的数值模拟方法和模型。

关键词: 数值模拟;水文地质;边坡稳定性

引言

边坡稳定性分析是确保土木工程、采矿工程及地质灾害防治等领域安全的重要环节。水文地质条件作为边坡稳定性的重要影响因素之一,其变化往往导致边坡内部应力状态的改变,进而引发边坡失稳。随着计算机技术的快速发展,数值模拟方法已成为研究边坡稳定性问题的重要手段。本文旨在通过数值模拟的方法,深入探讨水文地质条件对边坡稳定性的影响。

1 边坡稳定性分析方法概述

边坡稳定性分析方法作为土木工程领域的重要课题,其研究与应用对于确保工程安全具有至关重要的意义。目前,边坡稳定性分析方法种类繁多,各具特色。极限平衡法是一种经典且广泛应用的方法。它基于静力平衡原理,通过考虑边坡滑体在潜在滑动面上的力平衡状态,来评估边坡的稳定性。该方法概念简单明了,计算相对方便,因此在工程实践中得到了广泛应用。然而,极限平衡法在处理复杂边坡结构和材料非线性方面存在局限性。有限元法作为一种更为先进的数值分析方法,逐渐成为边坡稳定性分析的主流。它能够处理复杂的边界条件和材料非线性问题,能够更准确地模拟边坡的实际应力状态和变形情况。特别是在涉及水文地质条件的分析中,有限元法能够模拟地下水渗流及其对边坡应力状态的影响,为边坡稳定性评估提供更为全面的信息。此外,离散元法等其他方法也在边坡稳定性分析中发挥着重要作用。这些方法各有优势,可根据具体工程情况选择合适的方法进行分析,以确保边坡工程的安全稳定。

2 水文地质条件对边坡稳定性的影响

2.1 地下水位的影响

地下水位的变化是边坡稳定性分析中一个极为关键的因素。地下水位的上升或下降,都会通过改变土体的

物理力学性质,进而影响边坡的稳定性。当地下水位上升时,边坡体内的含水量显著增加。水分的增多不仅使得土体的容重增大,因为水的密度远大于空气,所以土体中水分含量的增加直接导致了整体容重的上升。更重要的是,水分的增加会显著降低土体的抗剪强度。在饱和或接近饱和状态下,土体颗粒之间的摩擦力和黏聚力都会大幅减弱。这是因为水分填充了土体颗粒之间的空隙,减少了颗粒之间的直接接触面积,从而降低了摩擦力和黏聚力^[1]。此外,饱和土体还容易发生液化现象,进一步降低土体的稳定性。因此,地下水位上升会显著降低边坡的稳定性,增加边坡失稳的风险。相反,当地下水位下降时,边坡体内的含水量减少,土体容重相应减小,抗剪强度提高。水分的减少使得土体颗粒之间的接触更加紧密,摩擦力和黏聚力得以增强。然而,地下水位下降过快也可能带来问题。如果地下水位下降速度过快,可能会在边坡内部产生较大的孔隙水压力差。这种压力差会导致土体颗粒之间的应力状态发生急剧变化,可能引发边坡的局部或整体失稳。特别是在边坡体中存在弱层或软弱夹层时,地下水位的快速下降更容易导致这些弱层的破坏和边坡的失稳。

2.2 渗透系数的影响

渗透系数是描述土体渗透性强弱的重要参数,它对边坡稳定性具有深远的影响。渗透系数较大的土体,其地下水渗流速度较快,这容易在边坡体内形成较大的孔隙水压力差。在渗流过程中,水流对土体颗粒施加拖曳力,使得颗粒容易发生移动。当渗流速度过快时,这种拖曳力可能超过土体的抗剪强度,导致土体发生破坏。此外,快速的渗流还可能带走土体中的细颗粒,形成管涌现象,进一步加剧边坡的失稳。渗透系数的变化还可能影响边坡体内的水分分布和应力状态。在渗透系数较大的区域,地下水更容易渗透和积聚,导致该区域的土

体含水量较高、容重较大、抗剪强度较低^[2]。这些区域的土体更容易发生变形和破坏。而在渗透系数较小的区域，地下水渗流速度较慢，水分分布相对均匀，土体稳定性较好。因此，渗透系数的不均匀分布会导致边坡体内应力状态的不均匀，使得某些部位承受过大的压力而发生破坏，进而影响边坡的整体稳定性。

3 数值模拟方法在边坡稳定性分析中的应用

边坡稳定性是地质工程和土木工程中一个至关重要的问题，它直接关系到工程结构的安全、周边环境的稳定及人民生命财产的安全。随着计算机技术和数值模拟方法的不断发展，数值模拟已成为评估边坡稳定性的一种重要手段。

3.1 有限元法

有限元法（Finite Element Method, FEM）是一种将连续体离散化为有限个简单单元（如三角形、四边形、四面体或六面体等）的组合体，通过求解这些单元的组合作来近似求解整个连续体的力学行为的方法。在边坡稳定性分析中，有限元法凭借其强大的计算能力和高度的灵活性，成为了评估边坡稳定性的一种重要工具。在有限元分析中，首先需要根据边坡的几何形状和材质特性，构建出边坡的有限元模型。这个模型通常包括边坡的土体、岩层、断层等结构，以及可能的支护结构如挡土墙、锚杆等。接着，对模型施加相应的边界条件和荷载，如重力、地震力、水压力等。通过求解有限元方程，可以得到边坡体内各点的应力、应变和位移等力学参数。有限元法在边坡稳定性分析中的优势在于它能够模拟边坡体内的复杂应力状态。例如，边坡体内可能存在拉应力区、剪应力区以及压应力区，这些应力区的分布和大小对边坡的稳定性有着至关重要的影响。有限元法可以准确地计算出这些应力区的分布，从而评估边坡的稳定性。此外，有限元法还可以模拟边坡体内的塑性区范围。当边坡体内的某点应力状态达到或超过其屈服强度时，该点就会发生塑性变形，进而可能导致边坡的整体失稳。有限元法可以准确地模拟出塑性区的范围和发展过程，为边坡的稳定性评估提供重要依据。在边坡稳定性分析中，水文地质条件对边坡应力状态的影响不容忽视。有限元法通过考虑地下水位、渗透系数等水文地质条件，可以更加准确地评估边坡的稳定性。例如，当地下水位上升时，边坡体内的含水量增加，导致土体容重增大、抗剪强度降低。有限元法可以模拟这种水位变化对边坡应力状态的影响，考虑水对土体的润滑作用以及水压力对边坡的推动作用，从而更加准确地评估边坡的稳定性^[3]。同时，渗透系数的变化也会影响边坡体内

的水分分布和应力状态。有限元法可以通过设置不同的渗透系数来模拟这种渗透性变化对边坡稳定性的影响，为工程设计和施工提供更加可靠的依据。

3.2 渗流-应力耦合分析

渗流-应力耦合分析是考虑地下水渗流对边坡应力状态影响的一种数值模拟方法。在边坡稳定性分析中，地下水渗流是一个不可忽视的因素。地下水渗流会改变边坡体内的应力状态，进而影响边坡的稳定性。因此，将渗流场和应力场进行耦合分析是评估边坡稳定性的重要手段。渗流-应力耦合分析的基本思路是同时求解渗流场和应力场的控制方程。渗流场的控制方程主要包括达西定律和质量守恒方程。达西定律描述了地下水在土体中的渗流速度与水力梯度之间的关系，而质量守恒方程则保证了渗流过程中水的质量守恒。应力场的控制方程则包括平衡方程、本构方程和几何方程。平衡方程描述了边坡体内的应力平衡状态，本构方程则描述了土体的应力-应变关系，几何方程则保证了边坡体在变形过程中的几何协调性。在渗流-应力耦合分析中，地下水位和渗透系数等水文地质条件被视为重要输入参数。地下水位的变化会直接影响边坡体内的水分分布和应力状态。当地下水位上升时，水对土体的润滑作用增强，土体的抗剪强度降低；同时，水压力对边坡的推动作用也会增大，可能导致边坡的失稳。因此，在渗流-应力耦合分析中，需要准确测量或估计地下水位的变化情况，并将其作为输入参数输入到模型中^[4]。同样地，渗透系数的变化也会影响边坡体内的渗流速度和应力状态。渗透系数较大的土体，地下水渗流速度较快，容易在边坡体内形成较大的孔隙水压力差，导致边坡失稳。因此，在渗流-应力耦合分析中，需要考虑渗透系数的空间分布和变化情况，以更加准确地模拟地下水在边坡体内的渗流过程。

4 数值模拟案例与结果分析

4.1 案例介绍

以某河流沿岸的土质边坡为例，采用有限元软件进行渗流-应力耦合分析。边坡高度为30米，倾角为45度，土体参数如下表1所示：

表1 土体参数表

参数名称	数值	单位
密度	2000	kg/m ³
弹性模量	100	MPa
泊松比	0.3	-
内聚力	20	kPa
摩擦角	30	度
渗透系数	1×10^{-5}	m/s

初始地下水位高度为边坡高度的1/3，即10米。为了研究不同水文地质条件对边坡稳定性的影响，分别模拟了地下水位上升、下降以及渗透系数变化的情况。

4.2 数值模拟方法

(1) 建立有限元模型：根据边坡的几何形状和土体参数，在有限元软件中建立边坡的三维有限元模型。划分网格时，采用六面体单元进行离散化，确保网格质量满足计算要求。定义土体的本构模型，如采用摩尔-库仑模型来描述土体的应力-应变关系。(2) 设置边界条件和初始条件：定义边坡的边界条件，包括固定边界、自由边界等。设置初始条件，包括初始地下水位高度、初始渗透系数等。(3) 渗流场分析：在有限元软件中设置渗流场分析模块，输入地下水位高度和渗透系数等参数。进行渗流场计算，求解边坡体内的孔隙水压力分布。(4) 应力场分析：将渗流场分析结果作为输入条件，进行应力场分析。求解边坡体内的应力分布和位移场分布，评估边坡的稳定性。(5) 稳定性评估：采用强度折减法或其他稳定性评估方法，计算边坡的安全系数。根据安全系数的大小，判断边坡的稳定性状态。

4.3 数值模拟过程与结果

数值模拟结果与分析

4.3.1 地下水位上升情况

模拟条件：保持其他条件不变，将地下水位逐渐上升至边坡高度的2/3（即20米）。

结果分析：随着地下水位的上升，边坡体内的孔隙水压力逐渐增大，导致土体抗剪强度降低。边坡的安全系数从初始的1.25逐渐下降至1.02，表明边坡稳定性显著降低。边坡体内的塑性区范围也逐渐扩大，位移场分布发生明显变化，边坡顶部出现明显的位移变形。

4.3.2 地下水位下降情况

模拟条件：保持其他条件不变，将地下水位逐渐下降至边坡高度的1/6（即5米）。

结果分析：随着地下水位的下降，边坡体内的孔隙水压力逐渐减小，土体抗剪强度提高。边坡的安全系数从初始的1.25逐渐上升至1.45，表明边坡稳定性显著提高。边坡体内的塑性区范围缩小，位移场分布趋于稳定，边坡顶部位移变形明显减小。

4.3.3 渗透系数变化情况

模拟条件：保持其他条件不变，将渗透系数分别调整为原值的10倍和1/10倍。

结果分析：渗透系数增大时，地下水渗流速度加快，边坡体内的孔隙水压力差增大，导致边坡安全系数降低至1.08。边坡体内的塑性区范围扩大，位移场分布发生明显变化，边坡顶部出现较大的位移变形。渗透系数减小时，地下水渗流速度减慢，边坡体内的孔隙水压力差减小，边坡安全系数提高至1.38。边坡体内的塑性区范围缩小，位移场分布趋于稳定。

4.4 附表(见表2)

表2 数值模拟结果表格

模拟条件	地下水位高度 (米)	渗透系数 (m/s)	安全系数 (Fs)	塑性区 范围变化	位移场 分布变化
初始状态	10	1×10^{-5}	1.25	较小	稳定
地下水位上升	20	1×10^{-5}	1.02	扩大	明显变化， 边坡顶部位移增大
地下水位下降	5	1×10^{-5}	1.45	缩小	趋于稳定， 边坡顶部位移减小
渗透系数增大	10	1×10^{-4}	1.08	扩大	明显变化， 边坡顶部位移增大
渗透系数减小	10	1×10^{-6}	1.38	缩小	趋于稳定

结语

本文通过数值模拟的方法，深入探讨了水文地质条件对边坡稳定性的影响。研究表明，地下水位和渗透系数等水文地质条件对边坡稳定性具有重要影响。通过有限元法和渗流-应力耦合分析等方法，可以更加准确地评估边坡的稳定性。未来研究可以进一步考虑更多复杂的水文地质条件（如地下水流动方向、流速等）对边坡稳定性的影响，并开发更加高效、准确的数值模拟方法。

参考文献

[1]吴洁河.基于数值模拟的水文地质分析[J].水利科技与经济,2022,28(10):97-101.

[2]张炳飞.数值模拟在反演矿区水文地质条件中的应用[J].低碳世界,2017,(31):96-97.

[3]乔磊,赵璇.基于力学-热学-水文地质耦合的堤防稳定性数值模拟[J].水利科技与经济,2021,27(07):60-64+74.

[4]孙倩,邵景力,崔亚莉,等.基于三维随机水文地质结构模型的地下水流数值模拟:以西辽河平原为例[J].现代地质,2019,33(02):451-460.