

岩土工程极限分析有限元法及其应用

王岩 罗杨

航天规划设计集团有限公司 北京市大兴区 102600

摘要: 极限分析是一种基于极限平衡原理的数值模拟技术,它是一种基于极限平衡的数值模拟技术,在给定的外部应力、应变等外部条件不变的情况下,通过对一系列几何参数、边界条件的分析,得到岩石的屈服、破坏和破坏全过程。本文以极限平衡与塑性理论为基础,提出了一种适用于岩土工程的极限分析方法。与常规的极限平衡分析方法相比,有限元方法无需求解 PDE,将其离散并转化为有限元,从而实现对材料的屈服、破坏等全过程的直接求解。在此基础上,提出了一种基于有限元法的岩土极限分析方法。有限元法主要是基于极限平衡理论和塑性力学理论发展起来的,近年来在岩土工程中得到了广泛应用。

关键词: 岩土工程; 极限分析; 有限元法

引言

目前,国内外对岩土工程失稳的研究主要集中在极限平衡与塑性两个方面,前者认为,当外力作用点不发生变化时,岩土体处于一种相对稳定的状态;而后者则认为,当外力作用点发生变化时,岩土体将产生破坏。在进行极限平衡分析时,由于应力与应变都是同步进行的,所以对其进行应力与应变的计算显得尤为重要。极限分析方法是利用有限元方法,对不同类型的岩土工程的失效模式进行数值模拟,并对其可能出现的各种失效模式进行预测。利用极限分析方法对岩石的屈服条件、破坏准则和全过程进行了分析。目前极限分析法已经广泛应用于工程领域中,其具有广泛的理论基础和较强的实际意义。

1. 基本概念

对于任意具有连续形变的有限单元,其应变能,动能,势能均可用有限元格式表达。采用节点处的应变能之和,以及节点处的位移能之和表达为总能。位能可以被表达为一个位能面,它的高程是一个数值的单位。将各节点沿同一方向进行变形,将各节点位移与势能面高程相结合,即可求出单元的刚度矩阵及单元的总势能。从而求出了整体的位能场。因此,利用有限元法分析和研究岩土工程中的若干问题是可行的。

1.1. 有限元强度折减法

强度折减系数法是一种适用于岩土工程问题的数值计算方法。在莫尔-库伦屈服准则基础上,利用强度折减系数

法对其进行数值计算,一旦失效面强度低于折减后的材料强度,就说明岩土体已经出现了损伤,此时必须对边坡进行加固以保证边坡的稳定性。该方法既能解决岩石的屈服与破坏问题,又能获得岩石的全过程中的应力场、位移场及塑性区的分布情况。本研究提出了一种新的基于强度折减系数的边坡稳定性评价方法。该方法通过精确计算边坡在特定条件下的应力分布,以及位移变化情况,结合塑性区理论,对边坡的潜在破坏风险进行了全面而细致地分析。此研究不仅提供了一种更科学、更精确的边坡稳定性评估手段,也为工程设计和施工提供了重要参考。通过本研究的深入探讨与应用,可以有效提高边坡稳定性设计的科学性和准确性,保障工程安全^[1]。

1.2. 单元屈服准则

在进行极限分析时,材料表现出显著的弹塑性特性是有限元分析的一个重要前提。弹塑性流动是一种不可逆流动,受外力影响而发生形变,但其形变与外力并非一一对应,为非平衡可逆流动。其原因在于:当外部载荷作用下,材料会先发生一种弹性形变,当外部载荷不断增大时,这种形变会不断累积,直到达到一个临界点,即屈服极限。其中, Δd 是构件的相对位移, α 是构件的屈服判据;该装置的极限承载力为 Δs ; σ_1 是构件的弹性模量, σ_2 是构件的屈服应力。在 $\Delta d > 0$ 的情况下,该单元会产生屈服;当 $\Delta s > 0$ 时,电池会出现破裂;当 $\Delta s < 0$ 时,电池仍处于原来的状态。

1.3. 数值方法

有限元法、边界元法和离散元法是目前国内外研究的热点和难点。有限元及边界元方法被广泛地用于岩土工程的极限分析,二者各有特色,就其求解思想而言,有限元和边界元均基于连续体,将连续体离散后,得到变形与应力;而边界元方法则将连续体的边界划分成若干个单元,并用其位移来描述问题。

极限分析数值方法在处理岩土工程问题时,面临着两大挑战。首先,其求解过程依赖于系统的初始条件,这些条件通常是不稳定和未知的,这限制了方法能够捕捉到岩土材料实际破坏过程中的详细信息。其次,该方法未能充分考虑到岩土材料的非线性特征,如应力应变关系的非线性变化等,这种局限性使得它在描述复杂变形行为时显得力不从心。因此,尽管极限分析方法在某些情况下可以提供有价值的初步预测,但对于深入理解和精确模拟岩土工程中的复杂行为,它仍然存在一定的局限性。近年来,随着计算机技术的快速发展,出现了一些新的数值方法。主要包括有限元方法、有限单元法、离散元法、随机分析和神经网络等。

1.4. 单元平衡方程

在岩土工程极限分析有限元计算中,单元平衡方程的建立是求解的前提和关键。对于应力—应变关系,可以使用双线性函数来表达。通常在假定单元体刚度矩阵为正交各向异性的条件下,可以通过线性方程组来描述单元体刚度矩阵的特征:

在考虑内应力的情况下,还应建立相应的应力—应变关系。在计算公式中,必须先求出各点的应力,然后才能求出各结点的应力。此外,还必须细致地测量构件的各个节点处的应力情况。这一步骤对于确保结构在长期使用中能够保持稳定至关重要,因为只有了解了这些关键部位的受力状态,才能对可能出现的潜在问题进行早期预警和处理^[2]。

2. 极限分析有限元法的特点和研究进展

极限分析有限元方法是一种将极限平衡与塑性力学相结合的数值仿真方法,通过构建多种结构参数及边界条件的计算模型,实现对不同工作状态下材料强度与变形的准确预测,为工程设计提供依据。极限分析有限元是近年来发展起来的一种新的研究方向。这种方法的优势在于:①能够解决多物理场耦合下的连续和非连续问题;②能够模拟材料在不同载荷作用下的失效与屈服行为;③能够实现对复杂外形的

有限元仿真;④具有较高的计算精度,能同时考虑到各种材料的强度差异。

极限分析有限元法是一种高效的结构分析方法,其主要特征包括:①在进行计算时假定已知的结构形状和尺寸;②所采用的材料参数必须是等同性的,即它们具有相同的物理性能和力学性质;③用于模拟的材料应为弹性体,这意味着材料的弹性模量在整个变形过程中保持不变。该方法巧妙地结合了连续体极限平衡理论与塑性力学的基本原理,特别关注塑性区的行为。通过监测塑性区的发展,可以有效判断材料是处于塑性失效状态还是继续保持稳定性。

在详细阐述有限单元法在岩土工程中的实际应用情况之后,进一步提出了创新的研究方法。该新思路旨在通过对现有技术的深入分析和优化,为岩土工程提供更为精确和高效的数值模拟解决方案。极限分析有限元方法得到快速发展,新的计算理论与方法层出不穷,包括:①新的连续介质分析法,非线性有限元,高阶连续介质法,隐式方法等;②极限分析有限元法在理论和应用方面取得了一系列成果,但还有待进一步完善和提高。

3. 岩土工程极限分析有限元法的应用

岩土工程极限分析有限元法的应用,是指利用有限元法在岩石与土壤等天然材料的力学特性研究中的应用。这种方法通过模拟实际问题中复杂的应力—应变关系,对基础结构的稳定性和安全性进行评估。它可以预测不同工况下地基的响应,为工程设计提供科学依据,确保建筑物、桥梁和隧道等基础设施能够在各种极端条件下保持稳定。此外,极限分析不仅有助于工程师在施工过程中进行方案的精细调整,以达到成本效益最大化,同时也能够有效地压缩工程建设周期。通过这种方式,工程师可以更加灵活地应对各种突发状况,确保项目按期完成,从而降低不必要的风险和损失。

3.1. 计算边坡的安全系数

边坡稳定问题是边坡设计与建设中的一个关键问题,它不仅影响着边坡的安全性和经济性,而且直接影响到整个工程的成败。在边坡施工过程中,对边坡稳定的影响因素有:地质环境,边坡的地质环境状况对边坡的稳定具有重要的作用,若边坡的地质环境状况较差,则有可能出现失稳;岩土体参数对边坡失稳也起着很大的作用,不同的岩土体具有不同的力学特性,其抗滑承载力也各不相同。施工技术是影响边坡稳定性的另一重要因素,如果施工过程中没有遵循相应

的技术标准和要求,那么也会导致边坡失稳。

深入探究边坡失稳的复杂机理时,不难发现,其核心在于边坡表面的滑动面和抵抗滑移能力之间的相互作用。这一相互作用中,存在一个至关重要的临界位移,它是衡量边坡稳定性的关键指标。当该临界位移达到一定值时,边坡将不再具备滑动的潜力,此时,边坡的稳定性得到了保证。然而,如果这个临界位移低于边坡的抗滑力,那么边坡便会处于潜在的失稳状态,面临着进一步下滑直至破坏的风险。因此,通过对这一临界位移进行精确测量与监控,可以有效预防边坡的失稳滑塌,确保边坡工程的安全可靠^[3]。

3.2. 分析岩土材料的抗剪强度

在实际的岩土工程中,由于岩体与土的剪切性质存在差异,因此,用传统的强度标准来计算岩土材料的抗剪强度已不再适用。所以,在实际工程中,有必要对岩土材料的剪切破坏机理进行研究。岩体与土的剪切破坏,可以归纳为屈服、流变和强化三种不同的应力状态。在屈服期内,应力为零;在淬硬阶段,应力持续增大。比如,对于岩石来说,其弹性部位具有塑性变形的特点;而在岩石中,塑性成分则表现为强度。这两种形式有很大的不同,所以不能用统一的强度标准来计算。但是,我们可以用数值的方法来研究它。

3.3. 分析挡土墙失稳破坏机理

目前,国内外对挡墙的稳定性的研究多集中于静态土压力系数的确定,极限挡土墙的构造和稳定分析。目前国内外关于静态土压力因素的研究主要集中在理论上,对于其对挡墙稳定作用的研究较少。在有限元法中,根据极限分析原理,用线性弹性模型来模拟静态土压力系数,并对其进行了弹塑性分析。将理论计算结果与仿真结果进行比较,结果表明,该方法是可行的、有效的。在深入的数值模拟研究中,我们观察到一个显著的现象:墙后的填土对挡土墙的稳定性的构成了关键影响。随着填土高度的增加,墙体的位移也随之增大,这表明土体变得更加紧密和坚固。这种紧密结合导致了稳定安全系数的降低,进而引发了墙体失稳的风险。因此,控制填土厚度与填土高度对于维持挡土墙结构的稳定性至关重要。

3.4. 计算地下水水位变化对岩土工程稳定性的影响

地下水水位上升对土体变形有一定的影响,尤其是在地下水水位上升的区域,由于土体中孔隙水压力的增加,土的抗

剪强度也会降低,从而导致土体的破坏。因此,地下水水位上升后,在处理土体变形时,必须采取相应措施。否则,在长期地下水水位变化条件下,很容易导致地基破坏。地下水水位变化后地基土的稳定性是一个非常重要的问题。如果地基土不能稳定,将直接影响到地下结构和工程的安全。因而,在解决与地下水相关的问题时,必须充分考量地下水位的波动对基础结构稳定性的潜在影响,确保工程设计和施工方案能够适应这种不确定因素。

结语

极限分析法是研究岩土工程破坏的一种有效方法,本项目从计算方法与应用两个层面展开。目前应用最为广泛的是极限平衡法,但其计算过程繁琐,计算量大,需要参数较多;有限元方法采用有限元方法对整体进行数值模拟,可以有效地弥补传统的极限平衡方法的不足。然而,有限元方法自身也有其自身的不足之处:①对复杂的外形和边界条件,很难获得精确的计算结果,需要借助数值计算加以修正;②有限元法在求解时易受人为干扰而产生误差;③计算时,需采用剖分等方式对计算精度进行调节,导致计算量增加。

在岩土工程中,有限元方法主要用于基坑开挖,边坡稳定分析,地基承载力分析,滑移稳定分析,桩基础施工等。随着计算机及数值仿真技术的飞速发展,其在岩土工程中的应用将日益增多。有限单元法是一种行之有效的方法,其计算方法简便,计算结果直观,并能实现可视化,在岩土工程中具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 张聪. 岩土工程极限分析有限元法及其运用[J]. 世界有色金属,2020,(14):233-234.
- [2] 刘永军,吴俊浩. 有限元极限分析法在岩土工程中的应用研究[J]. 中国高新科技,2021,(14):71-73.D
- [3] 葛雷. 岩土工程极限分析有限元法及其应用探讨[J]. 建材与装饰,2018,(37):163.

作者简介:王岩,男,1992年01月,满族,本科,内蒙古赤峰市,航天规划设计集团有限公司,工程师,研究方向:岩土工程。

作者简介:罗杨,男,1989年09月,满族,本科,河北省保定市,航天规划设计集团有限公司,工程师,研究方向:岩土工程。