

基于 3D 离散元的岩质边坡最大开挖角确定

刘 顺 昌, 王 亮 清, 陈 志 强

(中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:为解决岩质边坡最大开挖角确定的问题,利用 3D 离散元软件模拟边坡渐进开挖过程,探讨岩质边坡失稳的动态过程,从而确定岩质边坡的最大开挖角。以某水电坝址岩质边坡为例,对其进行数值模拟,结果所确定的最大边坡开挖角为 47°。数值分析表明,将 47°作为无支护条件下的边坡开挖角是合理的,与运动学方法所确定的 38°开挖角相比,更接近实际的极限情况。故用 3D 离散元确定节理岩质边坡的最大开挖角具有一定的实际应用价值,对边坡分级开挖,确定合理边坡开挖角具有一定的指导意义。

关键词:开挖角;三维离散元;渐进开挖;岩质边坡

中图分类号:P642.2 文献标志码:A

岩质边坡的稳定性主要受其内部软弱面的控制,对于结构面较发育的岩质边坡,其稳定性主要受结构面及其组合情况而定^[1]。目前在公路、铁路、大坝和矿山等工程边坡开挖中,确定边坡开挖角的主要方法是极限平衡法,其基本特点是,只考虑静力平衡条件和 Mohr - Coulomb 准则。然而,在大多数情况下,边坡稳定问题是静不定的。极限平衡法处理这个问题的对策是引入一些简化假定,使问题变得静定可解。这种处理,对计算结果的精度损害并不大,却使计算工作大为简化,因而在工程中获得广泛应用^[2-5]。

虽然极限平衡法应用较为广泛,但极限平衡法计算结果偏于保守,安全系数偏大且仅可用于分析具有少量节理切割的块体,对于强节理化岩体显得无能为力。而三维离散元法(以下简称 3DEC)可考虑岩块之间滑动、平移、转动和岩体断裂等复杂过程,具有宏观上的不连续性,可以较真实、动态地模拟边坡块体在开挖过程中应力、位移和变形状态的变化特征以及岩体破坏过程^[6]。

本文利用 3DEC 在模拟岩体的运动特征和变形分析方面的优势,模拟边坡渐进开挖过程(图 1),在这一过程中监测系统不平衡力和系统最大变形量情况,直至边坡发生失稳破坏,从而确定最大边坡开挖角。将所确定的最大边坡开挖角作为无支护条件下自然边坡

的开挖角,对边坡进行稳定性分析。同时将模拟结果与用运动学方法计算的结果比较,以阐释其用于确定最大边坡开挖角的可行性。

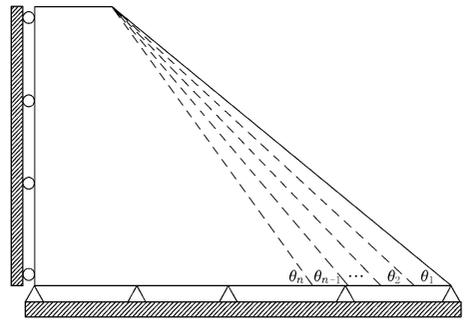


图 1 边坡渐进开挖示意

1 3DEC 程序简介

离散元法是 20 世纪 70 年代初由 Cundall 首先提出的。最初,离散元法的研究对象主要是岩石等非连续介质的力学行为,其基本思想是把不连续体分离为刚性元素的集合,使各个刚性元素满足运动方程,用逐步迭代的方法求解各刚性元素的运动方程,继而求得不连续体的整体运动形态。离散元方法允许单元间的相对运动,不一定要满足位移连续和变形协调条件,计算速度快,所需存储空间小,尤其适合求解大位移和非

线性的问题。

2 实例分析

2.1 工程概况

某水电站右岸岩质边坡岩性主要为三叠系竹卡组英安岩,节理裂隙较发育,通过野外结构面测量统计,区域内发育有 5 组优势结构面,其产状分别为:流层面 $78^\circ \angle 23^\circ$; 节理面一, $150^\circ \angle 63^\circ$; 节理面二, $247^\circ \angle 76^\circ$; 节理面三, $48^\circ \angle 69^\circ$; 节理面四, $0^\circ \angle 73^\circ$ 。节理走向玫瑰图如图 2 所示。

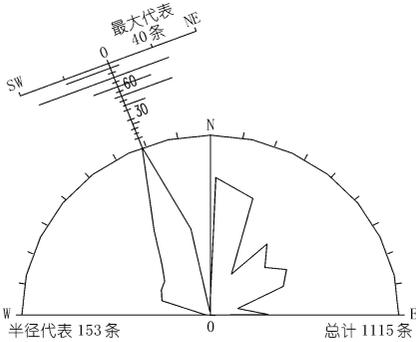


图 2 走向节理玫瑰图

2.2 计算参数

计算参数取值由综合试验结果和相邻工区的经验值以及岩体强度估算确定。最终选取的计算参数如表 1,2 所示。

表 1 岩体力学计算参数建议值

岩体性质	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	泊松 比	弹性 模量/GPa	抗剪强度	
				C/MPa	$\varphi/(^\circ)$
强风化岩体	2.65	0.25	12.44	0.60	34
弱风化-微新岩体	2.70	0.17	31.96	1.10	45

表 2 结构面计算参数建议值

岩体性质	流层面抗剪强度		节理面抗剪强度	
	C/MPa	$\varphi/(^\circ)$	C/MPa	$\varphi/(^\circ)$
强风化岩体	0.10	25	0.06	22
弱风化-微新岩体	0.47	32	0.23	28

2.3 3DEC 模型构建

根据边坡优势结构面的几何分布,建立 3DEC 几何模型如图 3 所示,自然边坡角为 37° ,每隔 $2^\circ \sim 3^\circ$ 设置一个虚拟结构面作为开挖面。模型各块体采用刚体模型,结构面采用库伦滑动模型,模型边界条件如图 1 所示。

2.4 数值计算结果分析

通过监测每次开挖过程中系统的最大不平衡力和

开挖后模型节点在 x,y 和 z 三个方向的最大变形量,依据应力或变形判别准则来判定边坡是否发生破坏,并确定边坡达到临界失稳破坏时所对应的边坡开挖角,以此作为此结构面组合控制下最大边坡开挖角。

开挖过程中系统不平衡力情况如图 4 所示。

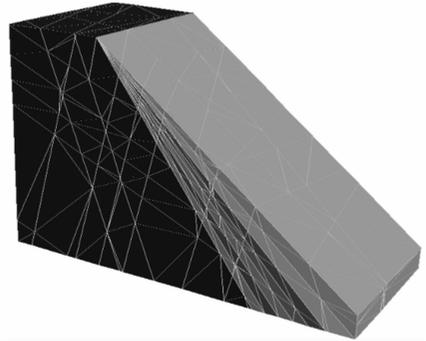


图 3 边坡 3DEC 几何模型

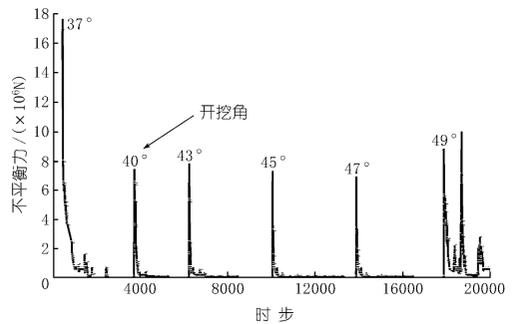


图 4 渐进开挖时系统最大不平衡力

系统节点在三个方向的最大变形量情况如图 5 所示。

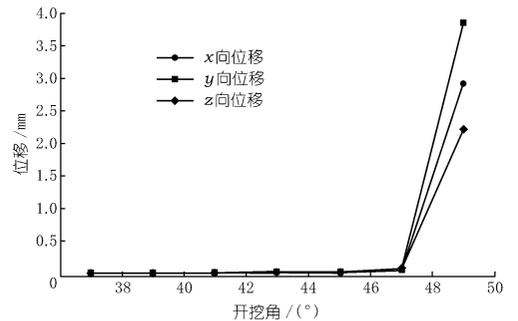


图 5 系统开挖时在 x,y,z 方向最大位移

由图 4,5 可以看出:该岩质边坡的边坡开挖角在 49° 时,系统处于不平衡状态,系统节点最大变形量发生突变现象,由此得出此时边坡已发生失稳破坏,故可将此边坡的最大开挖边坡角定为 47° 。

当在边坡开挖中对变形量有严格要求时,需结合边坡破坏判定的变形准则来确定最大边坡开挖角。

2.5 应用结果分析

将上一步数值计算得到的最大边坡开挖角 47° 作为在无支护条件下的边坡开挖角,对右岸岩质边坡进行 4 个阶段的开挖数值模拟分析。模型如图 6 所示。

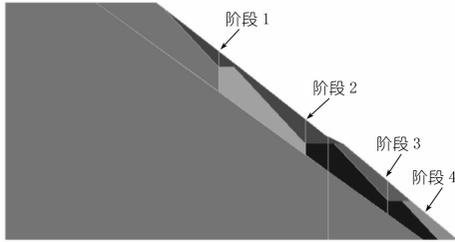


图 6 分步开挖模型

开挖过程中,系统最大不平衡力在各阶段均收敛,模型节点在三个方向的最大变形量无突变现象。

开挖过程中,边坡最大位移发生在坡面中上部,此处块体的最大位移量为 0.147 mm ,结构面法向应力为 0.12 MPa ,对比结构面剪切试验,在正应力为 0.12 MPa 、结构面位移为 0.147 mm 的情况下,结构面强度未达到屈服强度,边坡处于安全稳定状态。因此,将 47° 作为边坡的开挖角是安全可行的。

2.6 运动学方法分析

为了验证数值计算方法的准确性及可行性,本文同时用运动学方法对右岸边坡最大开挖角进行了求解,计算确定的最大边坡开挖角为 38° 。

两种方法对比,相对误差为 19.15% ,但运动学方法为半确定的方法,未考虑岩体受凝聚力的影响,同时假设结构面无限延伸,计算结果相对保守,数值模拟结果与之相差 9° ,与实际极限情况较接近,说明用 3DEC 模拟边坡开挖过程与实际边坡开挖过程相符,对边坡开挖角的设计具有一定的指导意义。

3 结论

利用 3DEC 在运动特征和变形分析方面的优势,通过对边坡渐进开挖过程的模拟,探讨岩质边坡的动态失稳过程,从而确定最大边坡开挖角。本边坡数值模拟结果的最大边坡开挖角为 47° ,并以此角度作为无支护条件下的边坡开挖角对边坡进行分步开挖模拟,结果表明边坡处于稳定状态。用半确定的运动学方法所法确定的最大边坡开挖角为 38° ,相对误差为 19.15% ,但运动学法未考虑凝聚力的影响,同时假设结构面无限延伸,计算结果相对保守,数值模拟结果与之相差 9° 。故用 3DEC 方法确定节理岩质边坡的最大边坡开挖角是可行的,具有一定的实际应用价值,对边坡分级开挖,以及确定合理边坡开挖角具有一定的指导意义。另外,由开挖过程中系统不平衡力曲线可以看出,开挖量的大小对系统的稳定有较大影响,开挖量越大,系统最大不平衡力越大,对边坡的扰动也越大,故在实际边坡开挖过程中宜采用少量多次的开挖方法。

参考文献:

- [1] 孙锡民,夏元友,蒋超.岩质路堑边坡最大稳定开挖坡角分析方法[J].公路,2006,(1):50-53.
- [2] 陈祖煜.土质边坡稳定性分析[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [3] Evert Hoek. Rock Engineering [M]. North Vancouver: Evert Hoek Consulting Engineering Inc,2000.
- [4] Erik Eberhardt. Rock Slope Stability Analysis Utilization of Advanced Numerical Techniques [M]. ETH Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology,2002.
- [5] 高大钊.岩土工程的回顾与前瞻[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] Cundall P A. Formulation of a three-dimensional distinct element model[J]. International Journal of Rock Mechanics,1988,25(3):107-115.

(编辑:赵凤超)

Determination of largest excavation angle of rock slope based on 3D discrete element method

LIU Shunchang, WANG Liangqing, CHEN Zhiqiang

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: To determine the largest excavation angle of rock slope, the failure of dynamics progress of rock slope is discussed by the simulation of gradual excavation based on 3D discrete element method, so as to determine its largest excavation angle. The numerical modeling is conducted with the case of a rock slope at the dam site of a hydropower project. The results show that the largest excavation angle is 47° ; without the supporting condition, the slope would be safe with the excavation angle of 47° ; Comparing with 38° that was determined by the traditional kinematic method, it is closer to the actual limits. Therefore, the largest excavation angle of rock slope determined by 3D discrete element method has practical value to determining a reasonable slope excavation angle when conducting the gradual excavation of slopes.

Key words: excavation angle; 3D discrete element method; gradual excavation; rock slope