

文章编号:1001-4179(2010)20-0012-04

边坡稳定性分析方法及其应用综述

李双平

(长江空间信息技术工程有限公司,湖北武汉430010)

摘要:在土木工程中,对边坡进行稳定性分析是设计的主要内容,其分析方法在工程实践中也得到了不断发展。回顾了边坡稳定性研究的发展过程,详细阐述了主要分析方法的原理、条件,并对主要分析方法的单个应用、组合应用、优缺点和适用范围作了简要介绍,旨在帮助读者全面了解边坡稳定性分析方法,并在实际工作中灵活应用。指出了可进一步研究应用的混沌、神经网络等非线性分析方法。

关键词:边坡稳定性;分析方法;适用范围;应用

中图分类号: TU47 **文献标志码:** A

由于各种工程的需要,随着现代科学技术的发展,对边坡稳定性的研究已经形成一个专门性的应用研究课题,并且日益得到发展。新中国成立以来,我国对边坡稳定性研究大致可分为3个阶段:

第1阶段(20世纪50年代)是从研究铁路路堑边坡和引水渠道边坡开始的。当时主要是对人工边坡的类型进行划分,采用工程地质类比法给出稳定边坡角,作为边坡设计的依据。

第2阶段(20世纪60年代)开始形成岩体结构的观点。划出了边坡岩体结构的类型,提出了实体比例投影方法,用以进行块体破坏的计算,判别边坡的稳定性,同时开展大型野外岩体力学试验,在边坡稳定计算方面也有了很大进展。

第3阶段(20世纪70年代以来)开始研究边坡变形破坏机理。在计算方面,不仅应用极限平衡原理,还应用弹塑性力学理论,并且随着计算机的发展,广泛采用有限单元法来分析边坡变形破坏条件及评价边坡的稳定性。同时,运动学方法,包括离散单元法、DDA法、数值流形方法、FLAC法等也得到了广泛应用。

近几年,模糊数学、人工神经网络、灰色理论、突变理论、分形理论、混沌等也逐渐被应用到边坡稳定分析领域。

1 主要分析方法

1.1 传统极限平衡法

目前,传统的极限平衡法是工程中用于边坡稳定分析最常用的方法,该方法以摩尔-库仑的抗剪强度理论为基础,将滑坡体划分为若干垂直土条,建立作用在这些垂直土条上的力的平衡方程式,求解安全系数,即通常所说的条分法,该方法在以下3方面引入了简化条件:①对滑裂面的形状作出假定,如假定滑裂面形状为折线、圆弧、对数螺旋线等;②放松静力平衡要求,求解过程中仅满足部分力和力矩的平衡要求;③对多余未知数的数值或分布形状作假定。上述3个简化条件使条分法的严密性受到损害。20世纪40年代以后,不少学者对条分法作了一些改进,主要体现在以下两个方面:①探索最危险滑弧位置的规律;②对基本假定作了修改和补充。其中毕肖普提出的关于安全系数定义的改变,对条分法的发展起到非常重要的作用。毕肖普等将土坡稳定安全系数定义为沿整个滑裂面的抗剪强度与实际产生的剪应力之比,这就使安全系数的物理意义更明确,而且使用范围更广泛。对于最危险滑弧的确定,国内外一些学者作了大量的研究。

收稿日期:2010-07-30

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2008BAC47B04)

作者简介:李双平,男,副经理,高级工程师,博士研究生,主要从事工程安全监测研究、设计及管理工。E-mail:cjwjgs_lsp@

126.com

泰勒图法为大家所熟悉,成都科技大学的张天宝在此基础上建立了简单土坡稳定安全系数与滑动圆弧位置之间的函数关系。另外,为了弥补条分法中对多余未知量所作假定的任意性,Morgenstern - Price、Janbu 等学者提出了土条侧向面不应发生剪切和拉伸破坏的合理性假定。1973 年,Janbu 针对滑动面为非圆弧的情况,提出了边坡稳定分析的普遍条分法;Morgenstern - Price 法是唯一在滑裂面的形状、静力平衡要求、多余未知数的选定各方面均不作假定的严格方法。

此外,极限平衡的其他计算方法还有斯宾塞法、沙尔玛法、不平衡推力传递法等,极限平衡法满足力和力矩平衡、摩尔 - 库仑破坏准则和应力边界条件,未考虑土体本身的应力 - 应变关系。实际上,土体也有可能产生无限制的塑性变形 - 塑性流动。在塑性力学中塑性极限分析的基础上,一些学者提出了对土坡稳定分析的塑性极限分析和模糊极值理论。潘家铮于 1977 年提出了滑坡极限分析的两条基本原理,即极小值和极大值原理。后来孙君实根据这两条原理建立和发展了新型的稳定分析理论 - 模糊极值理论。

近年来,有限元法迅速发展,利用有限元法,考虑到土的非线性本构关系,求出每一计算单元的应力及变形,根据不同的强度指标确定破坏区的位置及破坏范围的扩展情况,并设法将局部变形与整体破坏联系起来,求得合适的临界滑裂面位置,再根据极限平衡分析可推求整体安全系数。

1.2 数值分析方法

随着计算机技术的发展,数值分析方法也被广泛应用于边坡稳定分析当中。主要包括:有限差分法、有限单元法、离散单元法、拉格朗日法、非连续变形分析方法、流形元法和几种半解析元法等。有限差分法是用差分网格离散求解域,将工程问题的控制方程转化为差分方程,然后结合初始及边界条件,求解线性代数方程组,得到工程问题的解。有限单元法是将分析域离散成有限个只在结点相联结的子域,即有限元,然后在单元中采用低阶多项式插值,建立单元特性矩阵,再利用能量变分原理集合形成总特性矩阵,最后结合初始及边界条件求解,这是一种化整为零,由零及整的方法。离散元法以受节理切割成离散的块体为出发点,块与块之间在角和面上的接触处有相互作用;离散元法常应用于应力水平不高的情况,块体的弹性变形可以不计而将其视为刚性块体;根据岩块的几何形状及其邻接块体的关系,建立运动方程,采用以时步渐进迭代的动态松弛显示解法,求出每一时步块体位置和接触力,反复迭代直至平衡状态。离散元法也可考虑块体本身的弹性变形,称为变形离散元法。拉格朗日

法是一种分析非线性大变形问题的数值解法,它以连续介质力学为基础,利用差分格式,按时步积分求解,随着构形的变化不断更新坐标,允许介质有大的变形。非连续变形分析法是一种分析非连续节理岩体的数值方法,它以块体为单元,基于能量原理形成一个整体矩阵,用隐式方式求解;它源自有限元法,但与有限元法不同;在有限元法分析中未知数为结点自由度之和,而在非连续变形分析中未知数是块体的自由度之和;有限元法要求在结点处保持力的平衡和变形协调,而非连续变形分析中每个块体单独平衡和移动,在满足块体间一定的约束条件下,每个块体可以有自己的位移和变形,而在整个系统中允许块体间滑动,以及块体界面出现裂缝的张开和闭合。流形元法以拓扑流形和微分流形为基础,利用有限覆盖技术把连续和非连续变形的计算统一到数值流形中。它可以计算块体的变形和拉裂、裂缝的发展和开闭;从流形方法的一般有限覆盖的观点看,连续体的有限单元法和块体系统的非连续变形分析方法都可以看成是流形元法的特例。半解析元法是将解析法和数值法结合起来达到降维、减小计算量的目的,有时还可提高计算精度。常用的半解析元法有:有限条法、有限层法、有限线法和边界元法。这些半解析元法是相对有限元法而言的,它不象有限元法那样全域离散,而是在某个方向采用解析解的方法,利用解析解来降低维数,其他类同有限元法。

另外,近 20 年来,随着计算技术和量测技术的迅速发展,动力分析法也发展较快,从最早的线性总应力法,逐步发展为基于非线性有限单元法基础的有效应力动力分析方法和采用复杂弹塑性模型并考虑水土耦合作用的动力分析方法,从只能分析一维问题发展到能够分析二、三维问题,从只能分析饱和土体发展到能够分析多相非饱和土体。本构模型也从早期的线弹性模型发展为粘弹性模型、弹塑性模型、边界面模型、内时模型和结构面模型等。动力方程的计算方法也发展较快,出现了逐步积分法、振型迭加法、复反应分析法、有限差分分子结构法等方法。目前常用的动力分析方法主要有剪切梁法、集中质量法和数值分析法等。若考虑孔隙水对土体动力性质的影响,土体动力分析方法还可区分为总应力法和有效应力法。

2 各分析方法在边坡稳定性分析中的应用

边坡稳定性的分析方法有很多,除上述介绍的基本方法外,还可将两种或两种以上的分析方法结合起来应用,这些方法均取得了较好的效果。

2.1 条分法与有限元法相结合

到目前为止,在土坡稳定分析的工程实践中,多采

用极限平衡法,对于粘性土边坡的稳定分析,一般采用条分法。当存在渗流作用时,工程上一般采用简化方法忽略或粗略地计算地下水渗流的作用。在有些工程中,如基坑渗流场分布十分复杂,简化方法仅在少数情况下可以应用,当边坡中的水头差较大或采用降水措施时,渗流力的不利作用随之增大,简化方法计算结构则脱离实际较远,有时甚至得出错误的计算结果。

由于渗流有限元能够较为准确地模拟渗流场,因此将条分法和有限元法结合起来应用于边坡稳定性分析,能够发挥两种算法的优势。文献[1]详细地介绍了这两种方法相结合所依据的原理和具体实现过程,并对一简单基坑进行了计算分析,以及与常用的简化方法进行对比。结果说明条分法和有限元法结合计算边坡稳定性不仅可利用长期工程实践的经验,而且能适应边界条件较为复杂的渗流场计算。

2.2 人工神经网络方法

由于边坡系统是一个开放的复杂系统,边坡岩体稳定性状况是多种因素非线性耦合作用的结果,其中岩石强度特性、岩体结构、岩体风化作用和坡高是影响边坡岩体稳定性的基本因素,而水的作用、施工方式等构成了边坡岩体稳定性的诱发因素。这些因素有的是确定性的,但大部分具有随机性、模糊性、可变性等不确定性特点,它们对不同类型边坡岩体稳定性的影响权重是变化的,这些因子之间具有复杂的非线性关系。因此在边坡岩体稳定性分析过程中,应根据具体情况动态地选择参评因素,且要求分析边坡岩体稳定性的方法应具有能够同时处理确定性和不确定性信息的动态非线性的功能,并在大量已有的边坡工程实例基础上,客观地识别出边坡的稳定状态。因此边坡岩体稳定性分析的智能化研究引起了广泛的关注。近年来,发展的神经网络技术,具有自学习、自组织联想记忆能力和强容错性,为边坡稳定性智能化研究奠定了可靠基础。在综合分析边坡岩体变形失稳破坏模式及其影响因素的基础上,提出了表征边坡岩体稳定性分析的复合指标,根据国内在各种类型岩体及岩体结构中已经成功建造的水电工程边坡稳定状况等41个实例为学习样本,讨论了运用人工神经网络方法预测边坡岩体稳定性的有效性^[2]。研究表明:用人工神经网络方法预测边坡岩体的稳定状况是可行的。

2.3 非饱和土强度理论应用

我国南方地区广泛分布着残积土、膨胀土等粘土。该地区的山地或人工边坡在雨季常发生失稳破坏,而且以浅层滑坡为多见。由于近地表浅层土多为非饱和粘性土,气候变化对其力学性状有很大的影响。每年

雨季,降雨雨水入渗使土体饱和度增大,含水量增加,引起土体抗剪强度大幅下降。持续降雨还可引起地下水位上涨或在相对隔水层以上出现暂时性地下水。当持续降雨的历程和强度超过一定限度时,可导致边坡失稳乃至出现滑坡。由气候作用影响的粘性土层深度一般仅为数米,因而这类边坡失稳主要表现为浅层性。浅土层的物理、力学性状受天气因素影响会发生较明显的变化,常规的土坡稳定性分析方法往往不能反映这种因素的影响,因此发展一种能考虑降雨作用影响的土坡稳定性分析方法十分必要。

在极限平衡条分法提出之初,对雨水水分入渗的影响,可近似在分析中用孔隙水压力系数加以反映,但孔隙水压力系数是一个非常粗略的概念,并且计算中如何根据雨水入渗的情况确定其大小尚未从理论上解决。考虑渗透力作用的边坡稳定计算方法,通过有限单元法或其他一些简化方法得到边坡的渗流场及各个节点的渗透力,将渗透力作为边坡稳定计算中的外荷载求其安全系数。该方法从渗流角度考虑土中水分运动产生的渗透力对边坡稳定的影响。这样的处理方法并没有从理论上解决土中水分的入渗使土体软化,导致土体抗剪强度下降的问题,严格说来,降雨入渗的水分运动情况和通常的渗流是有差异的,二者得到的解答不一样,因而通常的渗流分析并不完全符合降雨入渗的情况。考虑残余强度的分析方法,该方法认为雨水入渗导致土体发生软化,使土体抗剪强度随着变形的发展逐渐趋于残余强度,因而在分析中通过对土体抗剪峰值强度的折减直至取土的残余强度。该方法也属于近似处理方法,在计算中如何确定降雨影响作用的程度,依经验选取土的强度指标。非饱和土强度理论为如何考虑降雨作用影响的土体抗剪强度开拓了一个方向。

在分析了残积土、膨胀土等边坡在降雨入渗情况下抗剪强度降低的主要原因后,探讨了现有的考虑雨水入渗影响的边坡稳定分析方法,运用非饱和土强度理论,提出非饱和土等效凝聚力新概念,从而可方便地使用常用的毕肖普法等极限平衡法进行考虑雨水入渗影响的边坡稳定分析计算^[3]。

2.4 运动单元法

岩土工程极限分析,如地基极限承载力、挡土墙极限土压力以及边坡稳定性分析,是典型的求塑性极限值问题。因岩土工程塑性区范围、塑性区边界和受力状态在分析之前都是未知的,迄今为止岩土工程的塑性极限分析仍是一个十分复杂的问题。作为岩土工程极限分析问题之一的边坡稳定性分析,边坡安全系数的计算是基于所确定的最危险滑动面求得的,安全系

数求解的关键问题是确定塑性滑动区和最危险的滑动面。对于几何形状多变、介质组成复杂和影响因素较多的边坡稳定性分析,目前多对实际问题作大量的简化得到基于经验或半经验的最危险的滑动面。相应求得的边坡安全系数偏大,计算误差难以估计,影响最终结论的可靠性。

岩土工程极限分析运动单元法由 Peter Gussmann 教授在 20 世纪 80 年代创立,这种塑性极限数值分析方法主要针对岩土这类摩尔-库仑介质。运动单元法认为,对于所有假设塑性滑动区和最危险滑动面,真正的最危险塑性区和滑动面对应的安全系数最小。该方法通过严格的自动搜索过程寻找满足约束方程和边界条件的最小安全系数并确定塑性滑动区和最危险滑动面,根本上提高了岩土工程极限分析结果的精度与可靠性,具有严格的数学力学基础,适用于各类地质条件、岩性和几何形状复杂的岩土工程的极限分析。曹平等人对运动单元法在边坡稳定性分析中的应用作了详细介绍^[4]。

2.5 余推力法

余推力法(不平衡推力传递法)假定条块间推力方向与上条块滑面平行,尽管只计力的平衡,但在无附加荷载情况下自动满足力矩平衡。余推力法简单实用,可考虑复杂形状的滑动面,在我国工程界被广泛应用,并纳入建筑规范,大量计算表明,当滑动面是圆弧时,余推力法和简化毕肖普法的计算安全系数是非常接近的,而且二者所搜索到的临界滑弧位置几乎重合。简化毕肖普法是国际公认的一种比较精确的计算方法。因此,有理由认为,当滑动面形状任意时,余推力法也不失为一种可依赖的工程实用方法。基于余推力法的边坡临界滑动场的建立具有理论意义和工程价值。针对岩体介质的特殊性和不连续性,各向异性及非线性破坏准则,建立岩体边坡临界滑动场的计算方法,并将其应用于峨口铁矿露天边坡的设计,大大提高了设计工作效率与计算精度^[5]。汪小刚等人将以前的边坡临界滑动场计算方法进行改进,计算基于余推力法的边坡临界滑动场,同时得到任意的临界滑动面及边坡最小安全系数^[6]。

2.6 基于地质力学模型的概化方法

大量的工程实例表明,倾倒破坏通常发生于层状结构的岩质边坡中,其典型的结构特征为岩层层面与边坡走向一致但倾向相反。如果同时存在一组或多组顺坡向的节理将岩层切割成离散的块体,则更容易发生此种类型的破坏。这类边坡的失稳形式与边坡剪切滑动破坏在边界条件、变形特征和力学机制上有着很

大的差异,因此,对倾倒破坏边坡稳定分析和评价也不同于常规的分析方法。Ashby、Cundall 等人最早开始倾倒破坏问题的研究。Goodman 和 Bray 首先建立了单块岩柱在倾斜平面上的稳定、滑动和倾倒的判据,提出了边坡倾倒破坏的极限平衡法,该方法目前已经在实际工程中得到了初步的应用。在 Goodman 和 Bray 的极限平衡理论中采用了如下的假定:① 岩体被两组或两组以上的节理面分割成离散的底裂面发生转动或滑动;② 岩柱底裂面完全连通,底裂面上只有摩擦力,不考虑粘聚力和岩桥的作用。岩柱之间传递的推力作用点位于每个岩柱侧面接触处的顶部。将上述方法用于实际边坡时,存在以下两个方面的问题:① 岩体中结构面的分布情况十分复杂,要将其简化为简化计算模型,传统的工程地质方法是无能为力的,通常都依靠工程地质人员的经验判断和假定,带有很大的为人性;② 岩体中的结构面并不是完全连通的,完全不考虑结构面之间完整岩石即岩桥的作用,将会使加固设计过于保守。针对上述问题,应用岩体结构面网络模拟原理,提出了一种边坡倾倒破坏地质力学模型的概化方法,并对 Goodman 和 Bray 的极限平衡分析理论作了改进,改进后的方法考虑了岩体结构面的具体分布特征和岩体结构面的连通率即岩桥的作用^[6]。

3 结语

影响边坡稳定性的因素很多,有许多是已知的,也有一些是未知的。本文详细介绍了边坡稳定性的分析方法,并且简单介绍了一些方法的适用范围。随着非线性科学的发展,混沌、分形、神经网络、小波等非线性方法也在边坡稳定性分析中得到了一定的应用,随着科学技术的发展,此类研究还可进一步深入。

参考文献:

- [1] 黄春娥, 龚晓南. 条分法与有限元法相结合分析渗流作用下的基坑边坡稳定性[J]. 水利学报, 2001, (3).
- [2] 陈昌彦, 王思敬, 沈小克. 边坡岩体稳定性的人工神经网络预测模型[J]. 岩土工程学报, 2001, (3).
- [3] 林鲁生, 蒋刚. 考虑降雨入渗影响的边坡稳定分析方法探讨[J]. 武汉大学学报, 2001, (2).
- [4] 曹平, Gussmann P. 运动单元法与边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, (12).
- [5] 朱大勇, 钱七虎, 周平生, 等. 岩体边坡临界滑动场计算方法及其在露天矿边坡设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, (10).
- [6] 汪小刚, 贾志欣, 陈祖煜, 等. 岩质边坡倾倒破坏的稳定分析方法[J]. 水利学报, 1996, (3).

(编辑: 邓玲)

(下转第 31 页)

(1) 围岩变形受施工开挖爆破和跟进支护速度影响较大,变化曲线呈阶跃式发展。

(2) 围岩地质条件对围岩变形影响较大,主厂房最大变形 47.21 mm,主变室最大变形 61.13 mm,尾调室最大变形 24.00 mm,均位于地质条件较差的部位。

(3) 围岩支护锚杆监测应力整体量级不大,局部浅层岩体破碎部位在爆破开挖阶段应力有较大发展,开挖结束后,锚杆应力稳定。

(4) 围岩锚索荷载变化主要表现为锁定后荷载增加,预应力损失较小,与围岩变形对应关系明显,起到限制围岩变形的作用;由于大部分监测锚索施工时按

超出设计荷载 10% 张拉锁定,故洞室锚索锚固力普遍较大,建议类似工程锚索施工时以设计荷载的 70% ~ 80% 左右张拉为宜。

总的来看,左岸地下厂房系统的监测施工质量良好,可信度高,能正确反映洞室围岩的变化情况与变化规律。所获得的监测成果,不仅为溪洛渡地下洞室群的安全运行提供了可靠依据,也为今后类似工程洞室开挖施工期的安全稳定评价积累了宝贵经验。

(编辑:李慧)

Analysis on safety monitoring data of underground chambers in left bank of Xiluodu Hydropower Station

FENG Xiaolei, SHI Yunjiang, YI Dan

(Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co., Ltd, Wuhan 430010, China)

Abstract: We analyze and evaluate the stress and deformation of surrounding rock in construction and excavation period by using rod extensometer, force sensor for pulling force measurement of anchor cable and bolt stress meters buried during construction of underground chambers in left bank of Xiluodu Hydropower Station. The surrounding rock deformation is compared with those of other large hydropower stations at home. The results show that the surrounding rock deformation is influenced by excavation and blast, following supporting speed and geological conditions; anchor stress is not large and tends to be stable; the effect of anchor cable support is satisfying. In the period of construction and excavation, the monitoring results of these underground chambers can reflect the deformation laws of the surrounding rock correctly.

Key words: underground chamber; safety monitoring; data analysis; Xiluodu Hydropower Station

(上接 15 页)

Overview on application of slope stability analysis method


LI Shuangping

(Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co., Ltd, Wuhan 430010, China)

Abstract: Slope stability analysis has been widely used in civil engineering, hydropower project and mine exploitation, and it is developing in engineering practice. We review the development of stability analysis study, and emphasize on principle, assumption, development of major analysis method, and give a brief introduction on single application, composite application, advantages and disadvantages, application scope of the analysis method for readers to obtain an overall understanding and to use the analysis methods for slope stability analysis in practical work flexibly. We propose that the further study should be focused on nonlinear method, such as chaotic method and neural network.

Key words: slope stability; analysis method; application scope; application

边坡稳定性分析方法及其应用综述

作者: [李双平](#), [LI Shuangping](#)
作者单位: [长江空间信息技术工程有限公司, 湖北, 武汉, 430010](#)
刊名: [人民长江](#) 
英文刊名: [YANGTZE RIVER](#)
年, 卷(期): 2010, 41 (20)

参考文献(6条)

1. [汪小刚;贾志欣;陈祖煜](#) [岩质边坡倾倒破坏的稳定分析方法](#) 1996(03)
2. [朱大勇;钱七虎;周早生](#) [岩体边坡临界滑动场计算方法及其在露天矿边坡设计中的应用](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 1999(10)
3. [曹平;Gussmann P](#) [运动单元法与边坡稳定性分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 1999(12)
4. [林鲁生;蒋刚](#) [考虑降雨入渗影响的边坡稳定分析方法探讨](#) 2001(02)
5. [陈昌彦;王思敬;沈小克](#) [边坡岩体稳定性的人工神经网络预测模型](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2001(03)
6. [黄春娥;龚晓南](#) [条分法与有限元法相结合分析渗流作用下的基坑边坡稳定性](#)[期刊论文]-[水利学报](#) 2001(03)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_rmcj201020004.aspx