

边坡稳定分析及其设计中的有关问题探讨

张瑞鹤

(兰州骏马市政工程设计咨询有限公司, 甘肃兰州 730030)

摘要:从工程角度出发对边坡稳定分析方法的实质及选用、强度参数的取值问题、雨水对边坡稳定的影响等进行了探讨,提出了公路边坡稳定与防护的措施。

关键词:土木工程;边坡稳定;强度参数;雨水;边坡防护

中图分类号:U416.14 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)01-0122-04

0 前言

随着经济的发展、国家基础设施的大规模建设以及西部大开发战略的进一步深化,西部一大批公路、铁路和水利工程的重大项目相继动工兴建。这些工程中一个普遍遇到的问题就是边坡稳定的问题,这一问题是土木工程和岩土工程中的重要研究课题,在岩土工程或土木工程领域占据相当重要的地位。多年来,许多学者致力于这方面的研究,取得了丰富的研究成果,但是由于土质的复杂性、特殊性,边坡的稳定分析、参数选用,至今仍是一大技术难题,特别是一些特殊土质的边坡,如岩质边坡,尚没有实用的分析方法等。本文就边坡分析方法的选用、抗剪强度的参数取值问题以及边坡防护措施方面作些探讨。

1 边坡稳定分析方法

1.1 极限平衡法

极限平衡法是边坡稳定分析中最常用的方法。它是通过分析在临近破坏状况下,土体外力与内部强度所提供抗力之间的平衡,计算土体在自身和外荷作用下的土坡稳定性程度,通常以边坡稳定系数表示:

$$F = \frac{s}{\tau} = \frac{c}{\tau} = \frac{tg\varphi}{tg\varphi'}$$

式中: s ——抗剪强度

τ ——实际剪应力

c 、 $tg\varphi$ ——土体实际的抗剪强度参数

c 、 $tg\varphi'$ ——土体达到极限状态时的抗剪强度参数

边坡中最小的稳定系数称为边坡稳定安全系数,它表示了该边坡的稳定程度。

边坡稳定分析的极限平衡法包括解析法和条分法,其中条分法研究应用最为广泛,由于条分力学模型简单,可以对边坡进行定量的稳定性评价,成为边坡稳定分析理论中重要的内容,已被工程人员广泛地采用。极限平衡条分法是1916年瑞典人彼德森最早提出的。他假定土坡稳定问题是平面应变问题,并对圆弧形滑裂面以上的土体划分垂直条块,计算中不考虑土条间的作用力,定义安全系数为滑裂面上全部抗滑力矩与滑动力矩之比。之后,许多学者对条分法进行了改进^{[1]~[4]}。其中,Bishop(1955年)^[1]重新定义安全系数为沿整个滑裂面的抗剪强度与实际产生剪应力的比值,使得物理意义更明确。经过长期工程实践,条分法已成为边坡稳定分析的主要方法之一。

条分法也存在一些问题,所作的人为假定的合理性直接影响到稳定分析的准确性。合理地确定临界滑裂面也是提高条分法准确性的关键。当滑动面形状任意时,确定临界滑动面的位置存在很大的困难。由于介质和状态方程的复杂性,滑动面位置决定的安全系数泛函不仅具有多重极值,有时还不连续。另外,该法完全不讨论岩体的应力应变关系,也不研究边坡岩体的变位情况,但由于条分法抓住了问题的主要方面,所以若使用得当,分析结果可以与实际符合得较好。再就是极限平衡条分法在边坡稳定分析的实际工程中积累的经验最为丰富,到目前为止,极限平衡条分法仍然是边坡稳定性分析的主要方法。

极限平衡条分法的基本要点是当坡体的抗剪参数(c 和 $tg\varphi$)降低 F_c 倍以后,坡体内存在一达到极限平衡状态的滑面,滑体处于临界失稳状态。其中, F_c 为坡体的安全系数,处于极限平衡状态的滑面满

收稿日期:2005-09-29

作者简介:张瑞鹤(1966-),男,甘肃兰州人,高级工程师,董事长兼总经理,从事市政工程技术管理工作。

足摩尔—库仑准则,即:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

对坡体进行极限平衡分析时,一般采用比较特殊的垂直条分方式,但 Sarma 法可以对更一般的任意条分方式进行分析。

1.2 有限元法

由于建立在极限平衡理论基础上的各种计算土坡稳定的方法,无法考虑土体内部的应力—应变关系,无法分析稳定破坏的发生和发展过程,更无法考虑局部变形对土坡稳定的影响。同时实践又证明,稳定和变形有着十分密切的关系。一个土坡在发生整体破坏之前,往往伴随着相当大的垂直沉降和侧向变形,利用有限元法,考虑到土的非线性应力—应变关系,求得每个计算单元的应力及变形后,便可根据不同强度指标确定破坏区的位置及破坏范围的扩展情况;若设法将局部破坏与整体破坏联系起来,求得合适的临界滑动面位置,再根据力的平衡关系推得安全系数。这样就将稳定问题与应力分析结合起来。在有限元法稳定分析中,确定圆形临界面不是困难问题,通常采用对称地改变圆心和变化半径长度找到临界滑面。选用不同的初始点、搜索方法,都可以找到临界滑面。而对于寻找非圆形滑面的技术却比较复杂。

概括来讲,边坡稳定分析中应用最多的上述两种方法,无论采用哪种方法都需要分两步来进行^[1]:

第1步,求抗滑安全系数的函数关系式:

$$F = \bar{F}\{y(x)\} \quad (1)$$

第2步,确定最小安全系数 F_1 ,

$$F_1 = \min \bar{F}\{y(x)\} = \bar{F}\{y_1(x)\} \quad (2)$$

从意义上讲,第1步是个力学过程,更确切地说是个岩土力学问题。在20世纪80年代以前边坡稳定分析的成果主要集中在定义抗滑安全系数的概念上,并且分析方法广泛采用极限平衡法。第2步是个数学问题,是个利用数学手段优化处理目标函数的过程,近年来边坡稳定分析的成果主要集中在这个方面。

在工程实际中,一般采用极限平衡条分法是完全可以满足工程需要的,对复杂、特殊岩体的边坡稳定问题应该采用有限元法进行分析。实际操作中可以采用我国港口工程规范《港口工程地基规范》(JTJ 250—98)进行边坡稳定分析,该规范采用了较为先进的基于可靠度理论的设计方法;即以概率理论为基础的极限状态设计法,以分项系数表达式表征的边坡稳定设计方法。应用起来实用、方便、可

靠,同时由于规范采用了考虑条间力的简化的 Bishop 法,计算的可靠度指标与实际更加接近。

2 边坡稳定分析的强度参数取值问题

边坡稳定分析中,计算参数选取的合理与否是关系到分析结果是否准确、可靠的关键。对西部大量存在的黄土地质尤为如此,大量的研究表明,在黄土边坡稳定计算中,由于计算方法不同引起的计算结果偏差与参数选取不当引起的偏差相比要小得多,因此正确地选取计算参数使计算结果符合实际,就成为边坡稳定分析设计中最关心的问题。而要正确地选取计算参数,必须准确把握各参数的来源及机理。

在边坡稳定设计中,往往需要确定滑面上的抗剪强度参数 φ, c 值。 φ, c 值一般可根据实验室内试验或现场原值试验获得。同时要有足够的试验组数,尽可能减小试验误差。1984年在加拿大举办的第四届国际滑坡学术会议上,许多学者提出了抗剪强度参数与粘性土基本性质之间的关系问题,即粘性土中粘粒含量及与之有关的塑性,是决定这类土的性质的的重要因素。对粘性土,当粘粒含量小于30%,塑性指数低于35时,在剪切过程中,颗粒间不会发生定向排列,故其抗剪强度峰值与残余值接近,基本不显脆性性状。如图1曲线1。当粘粒含量大于30%,塑性指数高于35时,在剪切过程,颗粒会定向排列,而形成滑动镜面,致使剪切强度降低,因此峰值与残余值之间有较大的差值,如图1中曲线2。非粘性土质,当颗粒结合紧密时,其 $\tau \sim \epsilon$ 曲线也表现为峰值与残余强度值有较大差异。对尚未滑动过的滑体,其滑面上的抗剪强度参数可取峰值。对古滑坡体,或多次滑动过的滑体,应取其残余强度值。

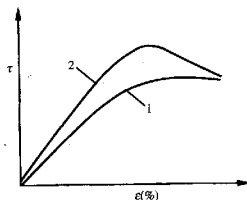


图1 粘性土的 $\tau \sim \epsilon$ 关系曲线图

应该注意,试验不能完全模拟真实的自然条件,因此滑坡的反算分析法,是估算真实强度有价值的方法。只有沿着不稳滑面的抗剪强度已接近残余值

时,边坡才变得不稳定。因此,对不稳定边坡的逆分析,推算滑面上的强度参数,为边坡的原位强度提供了下限值;相反,对天然边坡的类似分析,将得到接近上限值的强度参数。

3 雨水对边坡稳定的影响

水是产生边坡失稳的重要条件之一,崩塌、滑坡、泥石流等边坡失稳现象的发生和发展多受降水等因素的控制。有关资料统计显示,我国的边坡失稳大多与水有关。无论是少雨的西北地区,还是多雨的华南地区,从南到北,自东向西,绝大多数的崩塌、滑坡、泥石流发生在雨季。特别是在暴雨之后往往出现大量的滑坡、崩塌等边坡失稳现象,而且损失惨重。

3.1 雨水对不同土质和岩石边坡的影响

一般情况下,土质边坡可以分为砂土边坡、粉质土边坡、粘土边坡等。

砂土边坡:正常情况下砂土边坡表层土体呈干燥状态,砂土颗粒之间的粘聚力很少,边坡的稳定取决于土的内摩擦角,雨水增大了土颗粒之间的孔隙水,孔隙水压力减小了土颗粒之间的内摩擦力,内摩擦角减小。孔隙水含量越高内摩擦角越小。因此,砂土边坡的稳定性是相对的。在实际工程,可以看到砂土边坡可能在短期内多次滑动,砂土边坡在滑动到一定程度后即达到稳定,当孔隙水含量继续增加,砂土边坡还会发生滑动,直到形成新的稳定状态。原状山体的粗颗粒砂土,土颗粒之间存在一定的机械咬合力,它对边坡的稳定十分有利,且不受孔隙水含量的影响。

粘土边坡:正常情况下的粘土边坡呈硬塑~可塑状态,粘土颗粒之间有较强的粘聚力,土体抗剪强度较大,粘土边坡具有很好的稳定性,在雨水的作用下,土颗粒间的孔隙水含量逐渐增大,孔隙水的增大减小了土的粘聚力,土中孔隙水含量增大到一定程度时土体由硬塑变为软塑~流塑状态,土体的抗剪强度迅速减小。当土体自重产生的滑移大于土的抗剪强度时,边坡产生滑动。事实上土中的孔隙水含量不能无限增大,而粘土也具有较好的隔水性,雨水只能作用于土层表面。因此粘土边坡一般具有较好的稳定性,但干裂的粘土边坡,由于裂缝受雨水冲刷作用会发生局部滑坡。

粉质土边坡:粉质土边坡的破坏是常见的边坡破坏,粉质土的下卧土层一般都是性质不同的土层,或存在粘性土隔水层或是透水砂层,下卧层为岩层

时可能发生大面积滑坡。粉质粘土具有一定的透水性,在雨水的作用下内摩擦角减小,但由于内聚力的存在使它不会象砂土那样很快发生滑坡,随着孔隙水含量的增加土体抗剪强度降低,当某一个薄弱面所承受的应力大于土层抗剪强度时,边坡发生滑移。一定的透水性使粉质粘土可能会使下卧隔水层表面土体抗剪强度降低很多,边坡发生较大范围的滑移,土体有较大的滑移距离,具有较大的破坏性。

岩石边坡:对于岩石边坡稳定来说,起控制作用的是的岩体结构面的强度。岩体结构面分为硬质结构面与软弱结构面。水的介入对于硬质结构面的强度并无影响,而软弱结构面遇水后,特别是在原来充填介质含水量很少,降雨后却显著加大时,充填的软弱物进一步软化,其抗剪强度则显著降低。如长江三峡流域龙羊峡虎山坡,底孔泄流以前由于该地区年降雨量甚少,山体处于干燥状态。在泄流雨雾长期作用下,含水量大幅度增加,致使岩体强度大幅度降低,从而导致边坡失稳。在强风化带和软弱岩层区,灾害性滑坡常常发生。

3.2 降雨时间对边坡的影响

降雨时间越长对边坡稳定破坏作用越大是显而易见的,降雨时间越长,雨水渗入地表的厚度就越大,表层土的含水量也越大。雨水使表层土的自重加大,抗剪强度降低。当雨水对表层渗入的厚度达到一定程度时,均匀土体的表层土发生相对滑动。对存在下卧隔水层的土体来说,随着降雨时间的延长,雨水渗透到表层土与下卧隔水层之间,隔水层面上形成向下的排水梯度,地下水顺着隔水层流下,这时坡脚附近地表会有泉水冒出现象,还有一些细颗粒砂土随着泉水冒出。下卧层附近土体的密度降低,抗剪强度迅速降低,边坡发生大面积滑坡,暴雨可能在短时间内使砂土含水量大量增加,土体不能迅速排除雨水,边坡发生滑移。

4 边坡的防护措施

4.1 公路路线设计中的边坡处理问题

总的来说,目前公路沿线景观上的“黄土高坡”偏多,滑坡、崩塌也时常发生。这些问题的产生,与公路平面设计是否恰当关系较大。为此必须特别注意以下几个问题:(1)山区公路应用足最低技术标准,宜弯则弯,宜坡则坡,不要片面追求路线平直,以减少大填大挖。(2)要充分利用地形,过去低级公路是“就地扒”,高等级公路不行,应尽量减少破坏山体。(3)要充分且恰当地利用人工构造物的作用。

例如某山区专用线,经过鸡爪地形,半填半挖路段较多,很多横断面是上下两个高边坡,植被破坏严重,流失的水土破坏了山下的农田。如果注意上支下挡,上面用锚杆挂土工塑料网喷射混凝土支护,下边用加筋土挡土墙,则对山体破坏很少,造价也不一定高多少。一条公路设计不当,不仅给公路部门带来麻烦,而且破坏了环境,造成难以挽回的损失。

公路边坡设计过程中还有一个很重要的依据是工程地质条件。由于现实客观条件所限,在山区公路施工图设计时要得到较为确切的工程地质资料是困难的。因此,要做出合理的边坡设计也是困难的。只有在施工便道开通,必要的生活设施和钻探用水等得到解决时,才能进行较为详细的地质钻探和物探,获得较为确切的工程地质资料,做出正确的边坡施工设计图。

4.2 边坡防护工程措施

在平面布置及线路选线时,应尽量避免绕崩塌地段,若无法避让时,应根据滑坡范围、成因、性质及其发展变化的具体情况采取工程措施。可采用铲平斜坡、压力护坡、降低地下水位、预防侵蚀、电渗、干燥等方法,以及采取冻结、灌浆、岩石锚杆和锚桩、挡土墙、板桩挡土墙、坡脚挡土墙等措施。

(1) 排水:在地表排水滑体以外的地表水应拦截引离,滑坡体上的地表水要注意防渗,并尽快汇集引出。采用渗沟、盲洞及平孔等工程措施,排除滑坡地下水。

(2) 减重:为了增强稳定性,可在滑体上部采用减重的方法,以达到滑体的力学平衡。在一般情况下,滑坡减重只能减小滑体的下滑力,而不能根本解决滑体下滑和位置移动的问题。减重措施适用于滑动面不深、滑床上陡下缓、滑坡后壁式两侧岩层外露或土体稳定不可能再发展的滑坡,对于推动式滑坡或错落转变成的滑坡,效果更为显著。

(3) 支挡工程:

a. 抗滑土垛。可增加斜坡的稳定性,土垛一般可作整治滑坡的临时措施。

b. 抗滑片石垛。是靠片石垛的重量来增加抗滑力的一种简易抗滑措施。可用片石干砌或竹笼、木笼堆成。

c. 抗滑挡土墙。此种挡土墙的优点是山体破坏少,稳定滑坡收效快,但必须弄清滑坡的性质、滑体结构、滑面层位和层数、滑体的推力及基础地质情况,否则易使墙体变形而失效。抗滑挡土墙与一般挡土墙所承受土压力的方向、分布和作用点不

相同,按滑坡坡力计算确定。

d. 抗滑桩。抗滑桩一般适用于非塑体浅层和中厚层滑坡前缘,重力式支挡建筑物圬工量过大时,具有位置灵活、可分散使用、省时省料、破坏滑体较少、便于施工、易于形成、并能立即产生抗滑作用等特点,在国内外整治滑坡的工程中,已逐步推广使用。

e. 锚杆(锚索)。顺层滑坡的坡脚开挖路堑或半路堑后,会使牵引斜坡上部产生多级滑坍,可事先采用锚杆加固,不仅阻止斜坡岩层滑动,而且利于清理。锚杆设计时,必须考虑水分渗入对锚固作用的不利影响,如水对岩体的上浮力,裂隙间的静水压力、冻胀力,以及由于岩体抗剪强度降低等因素,安全系数应 ≥ 1.5 。锚杆表面涂上聚乙烯,然后用水泥砂浆封固钻孔。例如兰州市伏龙坪雨水出口整治工程中,排水系统原采用双道管径D800的PVC管与明渠相接。由于边坡落差大(大于60m)、坡度陡(排水管道两侧平均自然坡度约60°)、汇水面积大、边坡土质具有湿陷性,因此受山顶下泻排水和龙宝山庄局部排水的影响,坡体塌方严重,排水设施被完全冲毁,形成自上而下的冲沟,同时坡顶建筑物及地面出现不同程度的裂缝和塌陷。整治措施除了采用跌水、跌水边墙(钢筋混凝土材料)、消力池外,重点对该工程边坡进行了锚杆支护加固,对左右两侧跌水边墙沿高程每4m设置预应力锚索一孔,单根锚索长14m,锚固段长8m,锚索为三根高强钢丝线,直径15.24mm。经过整治之后,该地段未再出现滑坡、塌陷现象,排水管道经过两个雨季运行考验,情况良好。

参考文献

- [1] Bishop A. W., The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, Vol. 5, No. 1, 1955.
- [2] Morgenstern N. R. and Price V. E. The Analysis of the stability of general slip surface[J]. Geotechnique, vol. 15, No. 1, 1965.
- [3] Janbu N., Slope stability computations, Embankment-Dam Engineering[R], 1973.
- [4] 夏绪勇,王成华. 边坡稳定问题中的临界面搜索技术分析[A]. 天津市—河北省首届岩土工程学术会议论文集[C]. 岩土工程技术与进展, 2002, 4: 433~440.
- [5] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析. 北京: 水利出版社, 1980.
- [6] H. F. 温特特科恩, 方晓阳. 基础工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.