前　言

滑坡是自然界和人类工程活动所遇到的常见地质灾害，往往造成极大的经济损失和人员伤亡。因此，滑坡防治受到各国政府和工程技术界的广泛关注和高度重视。作为滑坡防治工作重要组成部分的滑坡稳定性评价在近40年以来取得了长足进步，滑坡稳定性评价方法不断丰富，特别是随着计算机技术的不断发展，计算精度得到了很大提高。就滑坡稳定性评价方法而言，主要分为三大类：一是弹塑性理论数值分析方法；二是基于刚体极限平衡理论的条分法；三是在此基础上发展起来的可靠度分析方法。尽管弹塑性理论数值分析方法和可靠度分析方法被广泛地应用于滑坡稳定性分析，但至今条分法仍是工程上使用最多、最成熟的方法。目前，我国相关规程规范对滑坡稳定性评价的方法基本上都采用条分法。

自20世纪30年代Fellenius(1927,1936)提出土坝圆弧型滑动稳定分析之后，经过Bishop(1952)、Morgenstern和Price(1965)、Spencer(1966)、Janbu(1973)、Sarma(1979)、陈祖煜(1983)等的改进和完善，条分法多达70余种，已经形成能够满足静力和力矩平衡，适用范围更广的通用条分法。条分法最初应用于土坝及土质边坡的稳定性评价，随后推广至岩质滑坡和岩土质滑坡(如在我国应用最为广泛的传递系数法)。由于岩质滑坡和岩土质滑坡的滑动面形态及边界条件的复杂性，条分法的应用受到很大的制约。

笔者在进行滑坡防治及边坡防护实践中，尤其是近十几年来，参与三峡库区移民新址选址地质论证和地质灾害防治工作中，进行了大量的滑坡稳定性评价工作，所遇到的、带有普遍性的问题是最危险滑动面的确定、滑带土剪切强度参数确定、如何考虑地下水压力和选择合理的稳定性计算方法。笔者在努力解决所遇到问题的同时，积累了许多经验，有一些成果已经得到推广应用。早在5年前，笔者就已着手进行系统整理工作，本专著今日出版与读者见面，深感欣慰。

本书详尽分析了条分法常用计算方法的适应性及其不足，采用递推法对条分法常用计算方法进行了改进，将基本上适应于土质滑坡的稳定性计算方法进一步推广到更为复杂的岩质滑坡和岩土质滑坡，创立了收敛性更好、适应范围更广、精度更高的实用递推法和精确递推法。结合滑坡，尤其是水库滑坡实例，讨论了有关滑动面剪切强度参数确定方法、孔隙水压力计算方法和最危险滑动面自动搜索等问题。本书注重实际应用，未涉及滑坡三维稳定性问题，对于弹塑性理论数值分析方法和可靠度分析方法也未进行深入讨论和分析。

本书不仅是笔者个人辛勤劳动的结晶，也凝结着长江水利委员会从事地质灾害防治工作广大技术人员的心血。冯明权在滑坡稳定性分析软件编制和调试过程中付出了辛勤劳动，童广勤担负了大量的计算、分析和绘图工作，刘世凯、李会中、高宇、张庆峰、吴永锋和周云等给予了各种帮助，在此特别致谢！

笔者

2007年9月12日

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

第一章　绪　论 …… (1)
第一节　滑坡研究历程 …… (1)
第二节　滑坡稳定性评价研究现状 …… (2)
第三节　滑坡防治 …… (9)
第四节　本书的主要内容 …… (11)
第二章　条分法的一般特点 …… (14)
第一节　几个基本概念 …… (14)
第二节　条分法的基本原理 …… (17)
第三节　条分法的一般特点 …… (18)
第四节　现有条分法的不足及解决办法 …… (24)
第三章　改进的传递系数法 …… (26)
第一节　传递系数法和不平衡推力法基本公式及其特点 …… (27)
第二节　改进的传递系数法 …… (30)
第三节　改进的传递系数法的特点及适应条件 …… (32)
第四节　计算实例 …… (34)
第四章　实用递推法 …… (37)
第一节　半精确条分法的一般递推公式 …… (37)
第二节　半精确条分法相关特解的改进及其特点 …… (42)
第三节　条分法的上下限解 …… (44)
第四节　实用递推法(SU－U 法) …… (46)
第五节　其他半精确条分法 …… (51)
第六节　半精确条分法的一般特点 …… (56)
第七节　计算实例 …… (57)
第五章　精确递推法 …… (59)
第一节　概　述 …… (59)
第二节　精确条分法的一般递推公式 …… (60)
第三节　精确条分法相关特解的改进及其收敛性 …… (67)
第四节　精确递推法(SU－M 法) …… (69)
第五节　简布法的递推公式 …… (77)
第六章　稳定性计算中几个常见问题的研究 …… (79)
第一节　剪切强度参数的确定 …… (79)
第二节　孔隙水压力的计算 …… (86)
第三节　地震力 …… (94)

第四节　设计阻滑力的确定 …… (95)
第五节　最危险滑动面搜索 …… (98)
第七章　滑坡稳定性评价及其方法的比较与优选 …… (103)
第一节　稳定性计算方法的优选 …… (103)
第二节　设计工况与安全系数 …… (106)
第三节　递推法软件(LSTT)简介 …… (111)
第八章　猴子石滑坡的稳定性评价 …… (116)
第一节　滑坡自然地质环境 …… (116)
第二节　滑坡工程地质特征 …… (122)
第三节　滑坡成因机制分析 …… (126)
第四节　滑坡稳定计算参数的确定 …… (127)
第五节　滑坡稳定性计算 …… (133)
第六节　滑坡稳定性评价 …… (138)
参考文献 …… (139)

第一章 绪 论

第一节 滑坡研究历程

滑坡是斜坡岩土体沿某一滑动面基本作整体性滑移运动的过程和结果。将滑坡稳定性作为一个学科加以研究仅仅只有一个多世纪的历史。1833 年，英国地质学家赖尔(Lyell，C. 1797～1875)在《地质学原理》一书中系统概括了地球上所发生的一些主要地质作用，把滑坡视为地下水地质作用的结果。随后滑坡稳定性研究便成为地质学家，尤其是构造地质学家的重要研究对象。早期的滑坡研究主要集中于滑坡的定性描述和滑坡所处地质环境、滑坡作用规律和机制分析等方面，滑坡稳定性研究仅限于单体刚性极限平衡分析。

20 世纪是滑坡灾害事件频繁发生的世纪，也是滑坡学研究突飞猛进的世纪。在 19、20 世纪交替期，伴随西方发达国家近代工业革命而兴起的大规模土木工程建设，诱发了大量滑坡，并造成了巨大损失。随着 20 世纪人类活动的加剧，尤其是大型水利水电工程的兴建，形成了高坝大库，人类工程活动诱发的滑坡灾害事件更是层出不穷。1923 年，因湖水位急剧消落、引起湖岸滑塌所造成的涌浪毁坏了瑞士达沃斯湖的浮动水泵站，机房工作人员全部死亡。20 世纪 50 年代，日本共有十几座水库产生滑坡，其中 6 处为水库蓄水后的库区滑坡，使库区公路和民房遭到破坏。1961 年 3 月 6 日，我国湖南拓溪水电站，在围堰挡水施工期，在坝上游 1.55km 处，右岸发生了滑速达 19.6m/s、150 $\times 10^4 m^3$ 的塘岩光滑坡，形成 20.8m 高的涌浪，高出大坝 3.6m，造成施工人员伤亡。1963 年 10 月 9 日，号称“二十世纪十大工程惨案”之一的意大利 Vaiont 滑坡是人类工程活动引起的、世界上灾难最严重的滑坡之一。在 30 秒钟内，2.4～3.0$\times 10^8 m^3$ 的岩土滑入库区，坝前 1.8km 的水库段被填满，滑坡激起的水浪越过高 266m 的拱坝，冲毁坝内和地下厂房内的大部分设施，使当时世界第二高坝废弃，并夺去了 2 600 余人的生命。这个事件对促进滑坡稳定性研究的发展具有里程碑意义，使人们在重视自然斜坡稳定的同时，更加关注人类工程活动所诱发的滑坡灾害，把滑坡提高到与人类工程活动有关的灾害地质过程的高度加以研究。

对于滑坡在力学上的发生机理，最初是从研究填土，即由均质土层滑坡开始的。到 18 世纪，由库仑、朗金发展为圆弧滑动理论。此后，又出现了摩擦圆法和分块计算法，并逐渐应用于自然斜坡的稳定性分析。与均质填土层不同，自然斜坡往往由具有不同工程地质性质的土层构成，在自然营力的作用下(如地下水的滞留或干湿交替促进岩土体的风化等)，在不同地层的接触面附近往往形成具有特殊工程地质性质的物质，自然斜坡依托此物质产生滑动。这些物质便构成了滑坡的滑带土。例如，由上部透水性强而下部透水性很弱的显著不同的两个地层(例如土层)组成的斜坡，渗透到地下的水以一定的流速通过上部透水层，在不透水土层接触面上滞留，形成了一个在均质斜坡中不可能有的、具有很大孔隙水压的含水层。由于土层物质成分的差异，在土层接触带会产生各种化学作用，可能破坏土体结构，降低土体强度；另外，由于孔隙水压力导致有效应力的降低、抗滑力的减小以及滑动力的增加，从而沿这种透水层和不透水层交界面产生滑坡。在一定条件下，孔隙水压力在透水层中还可能引起管涌或突发性的土

崩。由上部透水性很弱而下部透水性强的显著不同的两个地层(例如土层)组成的斜坡,在土层接触带产生各种化学作用,在可能破坏土体结构,降低土体强度的同时,下伏透水层中的地下水对上覆不透水层将产生巨大的扬压力,导致有效应力的降低、抗滑力的减小,而沿土层接触带产生滑坡。由于滑坡运动的重复,而固定了发生剪切破坏的层面,这就是滑动层的发生机理。因此,自然斜坡的滑动面是沿着一定的滑动层产生的,不能任意描绘。至于滑动层之上的土体,不管其性质如何,只有它的荷重才对滑动层起作用。因此,只要滑动层是连续的,在进行稳定性分析时,可以不考虑上部土体的性质,而只考虑沿滑动面的力学条件。

20 世纪 60 至 70 年代,通过对滑动面的产生、孕育、扩展及相应的斜坡变形破坏演变各阶段过程研究,在建立相应的滑坡变形破坏地质力学模式(Hoek and Bray,1977;晏同珍,1985;Alfreds and Jumikis,1983;Cruden,1989;Varnes,1978)的同时,认识到了滑坡,尤其是大型高速滑坡的发生应具备易滑的斜坡环境,并由此出现了"易滑动理论"的雏形——"危险组合"及滑坡学科学体系(晏同珍,1985,1992)。其中较为重要的是基于数学几何学概念,即由点到线、由线到面,提出的滑坡源学说(晏同珍,1981)。与点源理论相似,崔政权等结合我国重大水利工程——三峡水利枢纽工程和小浪底水利枢纽工程,开展了大规模工程地质研究,发现了"倾覆"构造和"反迭瓦"构造,相继提出了滑坡"起爆"理论(崔政权,1995,1996)和"倾倒"机制理论(赵颇,1986)。类似概念的提出,将滑坡理论认识提高到了一个紧密联系环境,将斜坡演变视为一个完整系统中在多种危险条件组合下最薄弱点、面扩展的历史系统观上。

20 世纪 80 年代以来,由于学科的交叉渗透和计算技术的提高,滑坡研究获得较大发展。系统论、灰色系统理论、信息论、数值模拟技术、分形理论、非线性动力学、神经元网络方法、专家智能系统等新理论、新技术、新方法在滑坡稳定性研究中得到了广泛应用,滑坡稳定性研究的理论与应用水平得到了极大提高。在确定性的单体刚性极限平衡分析的基础上,引入非确定性的概率分析方法以及塑性极限平衡法和数值分析法,并取得一批有实用价值的成果。尤其是系统论的导入,为滑坡稳定性研究提供了崭新的思路(崔政权,1992)。从系统论角度来看,斜坡环境系统有两个显著特点:一是开放性,即其与周围环境有着力学、能量及化学各种耦合作用;二是正反馈性(王建锋,1997)。所谓反馈就是系统输出与来自外部环境的输入关系,具有非稳定性、非平衡性、增长性和自增强性的特点。其总的特点是系统组成各要素将反复不断地加强,其结果是滑坡稳定性降低,系统演化要求趋向于一种吸引子态式以消耗最小能量。随着斜坡变形破坏的完成,系统能量得到释放,稳定性得以提高,斜坡内部结构由此松弛,外部不利因素作用更加容易。于是这一结构始终处于不稳定状态,形成正反馈增长过程。

第二节 滑坡稳定性评价研究现状

滑坡稳定性研究是经典土力学中的传统领域,也是今天岩土工程、工程地质、岩石力学等学科中的重要研究课题,其研究历史可追溯到 100 多年前(Duncan, 1996; Hoek and Bray, 1981)。滑坡稳定性分析方法最初是伴随土力学中的两个分支,即土压力和地基承载力发展起来的土质边坡稳定分析而发展起来的,是建立在土的摩尔-库仑破坏准则基础上的极限平衡方法。通过分析土体在破坏时的静力平衡来求得问题的解。在大多数情况下,极限平衡问题是静不定的,通过引入一些简化假定,使问题变得静定可解。自 20 世纪 30 年代 Fellenius(1927,1936)提出土坝圆弧滑动稳定分析之后,经过 Bishop(1952)、Morgenstern 和 Price(1965)、Spencer(1966)、Janbu

需要全本请访问 www.ertongbook.com

(1973)、Sarma(1979)、Chen(1983)等的改进,迄今已经形成能够满足静力平衡、同时满足静力和力矩平衡的几十种滑坡稳定性评价方法(刘钧等,1995;陈祖煜等,1988;张倬元等,1994),其中包括适用于各种形状滑动面的通用条分法。目前仍然有不少学者还在对该类方法进行改进和完善。20世纪70年代后期,随着计算机和有限元分析方法的产生和发展,应用严格的应力应变分析方法分析建筑结构的变形和稳定性成为可能。因此,有限元法也被广泛应用于边坡稳定性分析。采用这一方法,可以不必对一部分内力和滑动面形状作出假定,使分析研究成果的理论基础更为严密。但有限元方法也存在自身的局限,主要是在确定边坡的初始应力状态、把握边坡临近破坏时的弹塑性本构关系以及保证非线性数值分析的稳定性等方面遇到了困难。另外,也没有解决好计算成果与工程实践中采用的传统的安全系数判据接轨的问题。

滑坡稳定性评价方法可分为确定性方法和非确定性方法两大类。确定性方法又可按计算的基础理论划分为两个亚类,即极限平衡法和弹塑性理论数值分析法。前者包括现行的所有条分法,如简布法、传递系数法和Sarma法,以及楔形体法等;后者将滑体及滑带划分为许多小的计算单元,认为土体和岩体的破坏发生在小单元的边、角、面上。主要计算方法包括塑性极限平衡法和数值分析法等。非确定性方法是以极限平衡法为基础,通过引入稳定性计算参数的分布概率求得稳定系数的概率,从而判断滑坡的稳定性(表1-1)。与此同时,伴随近代土力学的发展,在确定边坡不同工作条件下的强度指标、孔隙水压力等方面也形成了一些行之有效的办法。这一完备的理论体系也随着非确定性分析的耦合而更加完善。近年来,三维力学模型的改善、可靠度理论的引入,使得边坡稳定性分析服务于工程的能力得到较大改善。

表1-1 滑坡稳定性计算方法的分类

类 型	亚 类	备 注
确定性方法	极限平衡法	现行主要适应土体的条分法:如瑞典圆弧法、Bishop法、Janbu法、Spencer法、Morgenstern-Spencer法等;对岩土体均适应的条分法,如不平衡推力法、Sarma法等
	弹塑性理论法	塑性极限平衡法:适于土质斜坡,假定土体为理想刚塑性体,按Mohr-Coulomb屈服准则确定稳定系数
		数值分析法:适于岩质斜坡,用弹塑(黏)性有限元等数值法,计算斜坡应力分布状况,按Mohr-Coulomb破坏准则计算出破坏点和塑性区分布状况,据此确定稳定系数
非确定性方法	破坏概率法	通过引入稳定性计算参数的分布概率(如c、φ概率分布等),计算滑坡稳定系数fos值的理论分布
	可靠度分析法	稳定性计算时,通过引入各种荷载分项系数求得稳定系数fos值的可靠度

Duncan(1996)总结说:"最近25年来,边坡静态稳定性和变形分析已经获得了巨大发展。微型计算机的广泛应用,已经给边坡稳定性分析的计算方面带来了巨大变化。与没有计算机时代相比,现在的分析工作更加彻底,并且从力学观点看,现在也更加精确。随着对斜坡变形破坏规律认识的深入及技术进步,滑坡稳定性计算方法得到了不断发展。当然,进行稳定性分析的工程师一定要有更多的计算机程序。他们必须全面地掌握土力学和土的强度,同时对他们所使用的计算机程序有更好的理解。另外,他们应有能力和耐心去验证他们的分析结果。"(Duncan,1996;贺可强,1996;中国岩石力学与工程学会,1996)但是实践证明,任何计算方法

能否很好地解决生产实际问题，在很大程度上依赖于地质模型的正确建立及其对变形破坏机制符合实际的分析。如果计算模型不能反映真实情况，那么所有分析评价的结果必然失真。

一、极限平衡分析法

极限平衡分析法（包括现行的各种条分法）研究历史可追溯到 20 世纪 20 年代或更早。Fellenius(1927)提出了边坡稳定分析的圆弧滑动分析方法，即瑞典圆弧法。该方法假定土条底部法向应力为土条重量在法线方向的投影。由于滑动面是圆弧，因此法向应力通过圆心，对圆心取力矩时，其力矩为零，使计算工作大大简化。这是没有计算机的年代的一个实用方法。Bishop(1950)对传统的 Fellenius 法作了重要改进。首先，他提出了安全系数的定义（即本书中的稳定系数），通过假定土条间的作用力为水平方向，求出土条底部的法向力。同样，Bishop 通过力矩平衡来确定稳定系数。在此后几十年里，研究者致力于通过力的平衡来确定不同滑动面形状滑坡的稳定系数。Janbu(1954)假定土条间作用力为水平，Lowe 和 Karafiath(1959)建议土条间作用力的倾角为土条顶部和底部倾角的平均值。美国陆军工程师团假定土条间作用力的倾角等于平均坝坡角，由此求得稳定系数。这些方法不能同时满足静力平衡和力矩平衡的条件，属于半精确的条分法。随着计算机的出现和普及，同时满足静力和力矩平衡的精确条分法开始出现。Morgenstern 和 Price(1965)提出了适用于任意形状滑动面的精确条分方法。以后 Spencer 提出了土条间作用力倾角为常数的方法。1973 年，Janbu 通过假定土条侧向力的作用点，提出了同时满足静力和力矩平衡的“通用条分法”。陈祖煜教授和 Morgenstern 教授对适应于土体的 Morgenstern－Price 法作了如下改进（Chen and Morgenstern, 1983）：①完整地推导出了静力平衡微分方程的闭合解，提出了求解稳定系数的解析方法，使数值分析的收敛问题得到了很大改善；②提出了为保证剪应力成对原理不被破坏，土条侧向力在边界上必须遵守的限制条件，因而减少了对土条侧向力所作的假定的随意性；③提出了一个求解稳定系数合理解的最大值、最小值的方法，并通过计算实例说明最大值、最小值确实十分接近。

以极限平衡理论为基础的条分法经过不断完善与发展，已成为工程上使用最多、最成熟的方法。其优点是可以方便考虑斜坡岩土体的不连续性、各向异性及非均质性和水压力作用等复杂边界条件及外荷载作用，在不给出应力形变图像情况下，仍能对滑坡稳定给出较精确的结论。应用极限平衡法对滑坡稳定性进行评价时，首先需要通过详细的工程地质调查确定可能的滑动面位置和形态，并确定可能滑动面的强度参数及其计算参数，最后寻找出最小稳定系数并与事先确定的安全系数进行比较，以此评价滑坡稳定性。

传统上，主要应用极限平衡方法进行二维土质滑坡的稳定性分析。它们是从二维边坡稳定性研究中发展起来的。对于岩质边坡，在条件许可时可借用较为成熟的土质边坡稳定性分析方法，如简化 Bishop 法、Janbu 法等。楔形体稳定性计算法和 Sarma 法等则是专门针对岩质边坡稳定性开发的。迄今为止，已经发展了许多二维滑坡稳定性分析方法（表 1－2）。纵观二维滑坡稳定性极限平衡分析方法的发展历史可以看出，其完善程度在很大程度上得益于计算机的发展。在今天看来，Whitman 和 Bailey 早在 1967 年就准确预测和具体想象了计算机运用于边坡稳定分析的过程（Whitman and Bailey, 1991）。边坡稳定性计算机分析至少在两个方面引起了革命性变化：第一，能够运用满足静力和力矩平衡的“高级方法”进行分析，因此必然的结果是，能够运用计算机进行计算精度方面的基础性的彻底研究；第二，能够分析大量

表 1-2 主要条分法的特点

方 法	应用条件及特征	参考文献
稳定图法	对大多数分析来说，精度足够，比详细的计算机分析速度快	Janbu，1968；Duncan 等，1987
瑞典条分法	圆弧滑面，定转动中心，各条块间作用合力平行滑面，满足力矩平衡，不满足水平、垂直力平衡	Fellenius，1927、1936
改进 Bishop 法	圆弧滑面，拟合圆弧与转心，各条块间作用力水平，条块间切向力 X 为零，满足力矩平衡，满足垂直力平衡，不满足水平力平衡	Bishop，1955
Janbu 普通条分法	适用于任何形状滑动面，满足力矩平衡，满足垂直、水平力的平衡，允许侧向力方向变化，常遇到数值问题。简化计算，令条块间切向力 $X=0$，再对稳定系数作修正	Janbu，1968
Hoek 楔体分析法	楔形滑面，各滑面均为平面，以各滑面总抗滑力和楔体总下滑力确定稳定系数	Hoek，1974
传递系数法	圆弧或非圆弧滑面。条块间合力方向与上一条块滑面平行（$X_i/E_i=\mathrm{tg}\alpha_{i-1}$）	1977
Sarma 法	非圆弧滑面或楔形滑面等复杂滑面。认为除平面和圆弧面外，滑体必先破裂成相互滑动的块体才能滑动，该方法以保证块体处于极限平衡状态为准则，确定稳定系数	Sarma，1979
Morgenstern 和 Spencer 法	适用于任何形状滑动面，满足力矩平衡，满足垂直、水平力的平衡，条块间垂直与水平作用力之比（X/E）存在与水平方向坐标的函数关系[$(X/E=\lambda f(x)$]，允许侧向力方向变化，常遇到数值问题	Morgenstern and Spencer，1965
Spencer 法	圆弧滑面，或拟合中心圆弧。条块间垂直与水平作用力之比（X/E）为一给定常数值	Spencer，1965

的滑动面，从而在高度不确定条件下寻找到临界滑动面。但是，必须注意到这些满足静力和力矩平衡的“精确”条分法一般情况下只适应于土体滑坡，对于滑动面不规则的岩土质滑坡或岩质滑坡存在很大的局限性。

自 20 世纪 60 年代以来，不少学者进行了滑坡稳定性三维分析理论研究工作。但迄今为止，还没有可供利用的成熟三维商业程序。所研究的问题可以分为三方面：①平面上为弧形或者包括拐角；②坡顶受到有限荷载作用；③破坏面受物理边界（physical boundaries）控制，如狭窄基岩河谷中的大坝，或者具有碗形垫层（bowl - shaped linear）的废料储库。

已有的三维分析方法可以归结为两类：

1. 极限平衡法（the limit equilibrium approaches）

Duncan（1996）评述了 24 篇这方面的文献。这类方法将滑体划分为一系列垂直柱体，并用静力极限平衡法求解稳定系数。其中，Hungr（1987）、Hungr 等（1989）、Chen 和 Chameau（1983）、Lam 和 Fredlund（1993）分别将简化的 Bishop 法、Spencer 法、Morgenstern 和 Spencer 法由二维扩展到三维。Stark 和 Eid（1998）评述了三个商业程序，并利用这些程序计算了几个滑坡，最终认为：“由于几何、材料性质和分析方法的限制，商业程序计算三维稳定系数结果很

差”。这类方法的缺点是：第一，为了使问题静定，必须引入大量假设。Lam 和 Fredlund (1993)将由物理和力学要求建立的平衡方程数增加到未知量的数目后发现，对于 n 行 m 列的滑体而言，必须建立 $8mn$ 个假设；第二，这类方法涉及复杂的三维矢量运算和非线性方程组的求解，迭代运算也不可避免；第三，由于这类方法尚未成熟，迄今为止还没有见到实用的三维临界滑动面搜索结果报道。

2. 上限解法(upper bound approaches)

Chen(1975)详细论述过塑性力学中的上限理论的基本原理。Michalowski(1980)和 Lin (1989)已经将这一理论运用于三维边坡稳定计算。但是，他们的工作仅仅是基于解析解，这意味着仅适用于直线(straight lines)或对数螺型线(logarithmic lines)滑面情况。他们的模型将复杂的滑动面简化为两条相互连接的直线，材料视为均质的，地下水或被忽略或被过渡简化。这些简化实际上已经使得这些解析解失去了实用意义。为了克服这些局限，Donald 和 Chen (1997)首先发展了基于上限定理的三维边坡稳定计算的数值解。可以说，这是一个具有突破性的进展。这一方法属于斜条分法，本质上相当于 Sarma 法，因此尤其适合于岩质边坡稳定性计算。但是，Donald 和 Chen 的方法在具体实现途径上不同于 Sarma 法。前者是基于建立协调的速度场，并用功能平衡方程求解稳定系数。这一数值方法成功地收敛到了一系列经典问题的封闭解。随后，Chen 等(2000)又成功地将上述结果推广于三维问题。在三维分析中，滑体被划分成一系列具有倾斜接触面的棱柱。这一方法的最大好处是，上限定理的运用避免了引入大量的假设条件，因而也就避免了大量烦杂的矢量运算，稳定系数的求解仍然在功能平衡的标量运算中。

对于三维问题，Duncan(1996)认为，基于已有研究可以得出如下三点结论：

(1)如果稳定系数(fos_2)的计算是针对临界的二维剖面的话，三维稳定性分析所得稳定系数(fos_3)大于二维分析结果，即 $fos_3 > fos_2$。唯一例外的情况是 Hovland(1977)，Chen 和 Chameau(1983)以及 Seed 等(1990)的三维计算实例。Hovland 的分析是基于瑞典条分法(ordinary method of slices)进行的，而瑞典条分法假定垂直面上的正应力为零，是极不精确的。Azzouz 和 Baligh(1978)指出，对于某些条件而言，瑞典条分法计算结果是不合逻辑的，不适合扩展于三维计算。Hutchinson 和 Sarma(1985)则怀疑 Chen 和 Chameau 以及 Ugai(1988)的某些假定，后者正像 Chen 和 Chameau 一样，把 Spencer 法扩展到了三维，并发现 $fos_3 > fos_2$。Seed 等对比了二维、三维的分析结果，而这些分析结果并不满足所有平衡条件。在 Seed 等的近似三维分析中，水平不平衡力大约是滑体重量的 3.7%。由于沿着他们所研究的滑动面的摩擦角很小(8°～9°)，因此这一不平衡力能够导致稳定系数高达 25%的误差。因此，所有发现 $fos_3 < fos_2$ 的情况，看起来都包含了很大的潜在不精确性。Cavounidis(1987)认为：“给出 $fos_3/fos_2 < 1$ 的方法，要么是比较了不合适的稳定系数，要么更可能的是包含了忽略问题重要方面(neglect important aspects of the problems)的简化假设”。

(2)Hutchinson 和 Sarma(1985)、Leshchinsky 和 Baker(1986)指出，就均质无黏性土(homogeneous cohesionless soils)而言，因为临界滑动面是平行于边坡面的浅层滑动面，二维和三维分析应当给出同样的稳定系数。

(3)Azzouz 等(1981)、Leshchinsky 和 Huang(1991)指出，如果在反算剪切强度中(to back calculate shear strengths)忽略三维效应，那么反算结果将会过高。

Huang 等(2000，2002)发展了一种更普适的三维新算法，其中包括一整套计算公式、比较

分析和计算实例。他的方法适用于任意滑动面的三维滑体，方程的推导基于两个方向的力和力矩平衡分析(two - directional force and moment equilibrium)。取代以往的假定，该法可以精确计算出滑动面上剪切力的作用方向，同时也不需要建立有可能增加计算量的局部坐标，因此这种方法适合于 3D(三维)上搜索临界滑动面(a computer - aided 3D search for the critical failure surfaces)。

总的来说，三维稳定性评价方法有了突破性的进展，但离实际应用尚有一定距离。

从极限平衡分析法的发展过程来看，其经历了一个由简单到复杂，由单纯的满足静力平衡条件或总体力矩平衡条件到既满足静力平衡条件同时又满足力矩平衡条件，由仅针对人工土质边坡过渡到自然斜坡的过程。在其发展过程中，极限平衡分析法中同时满足静力平衡条件和力矩平衡条件的"精确"条分法的收敛性一直是一个令人头痛的问题，特别是将"精确"条分法应用于自然斜坡时更为突出。为此人们首先在满足静力平衡条件的条分法方面进行了探讨，先后提出了考虑滑动面起伏特点的罗厄法、传递系数法等。尽管这些方法存在第二章第二节所提到的诸多不足，但其基本能满足工程上的迫切需要，至今仍被广泛应用。在同时满足静力平衡条件和力矩平衡条件的"精确"条分法由针对人工土质边坡过渡到自然斜坡方面，自 1954 年简布(Jianbu)提出了"普遍条分法"的概念之后，许多学者进行过认真的探索和研究。应该说，对于人工填土边坡以及较为均一的土质斜坡，"精确"条分法的收敛性问题已经得到较好的解决。但对于滑动面不规则的大型岩土质滑坡，由于地形地貌复杂性及滑动面形态的多变性等原因，各分条间作用力的大小和作用方向也是多变的，分条间作用力的作用方向难以用一个简单的函数关系加以表达。因此，将现行各种"精确"条分法用于评价滑动面不规则的大型岩土质滑坡的稳定性时均存在不同程度的收敛性问题。本书第五章的精确递推法在这方面进行了探讨，能基本解决滑动面不规则的岩土质滑坡稳定性评价平衡方程的收敛性问题。

二、弹塑性理论分析方法

弹塑性理论分析方法主要包括作为塑性理论一个重要组成部分的塑性极限平衡理论法和弹塑性理论数值解法。随着计算技术的发展，以后者为常用。由于斜坡稳定问题可分为变形与破坏两类问题，研究变形问题时侧重于计算斜坡岩土位移变化，研究破坏问题时侧重于计算滑移面上剪力和抗剪力，且可视破坏为一种极端的位移状态；又由于位移可在现场直接测定，因此近年来人们普遍认为控制斜坡岩土体位移是设计边坡工程的最合理途径，可以采用位移判据对斜坡稳定性进行评价。弹塑性理论分析法能够适应按控制位移进行设计的要求，然而直到目前为止还没有制定出控制位移的设计标准，因而限制了这种方法在生产中的实际应用效果，往往是得到的精确定量结果只能作定性使用。并且其计算精度取决于本构模型及单元参数的精度，若二者精度不同则分析所得结论就会像数据本身一样没有把握，令人生疑。同时，将其定量结果用于评价时仍需借助于极限平衡方法。但是在滑坡形成机制乃至演化全过程仿真模拟方面则为其他方法所不及，有其独到优点。

实践证明，弹塑性理论数值分析方法有时可行，有时则产生相当大的误差，甚至得出错误结论。其主要原因是理论本身的假定条件与实际斜坡岩土体特性偏离所造成的。弹塑性理论假定斜坡岩土体为均质、各向同性、连续的线弹性体，这种要求是相当严格的。虽然这种方法能够考虑材料的物理非线性问题，但从几何理论角度来看，它仍然为小变形近似理论，应用该理论进行具有大变形特点的斜坡稳定性分析无疑会产生较大误差，甚至得出错误结论。由于

传统的有限元数值方法用于几何大变形的斜坡稳定问题违背了质量守恒原理，因此有的学者否定了该法用于解决几何大变形的斜坡稳定问题，进而提出了非线性大变形几何理论(Low and Teh，1999)，但这一新的理论尚须完善和发展。

三、概率分析方法

可靠性设计方法是基于工程设计中有很多计算参数是随机变量这一特点，而建立在概率统计基础上的。它与安全系数法相比具有明显的优越性。1992 年制定的《工程结构可靠度设计统一标准》(GB50153 — 92)，标志着以二阶矩为基础的结构可靠度分析方法已进入实用化阶段。在岩土工程的设计方面，已经从定值设计法向极限状态设计法过渡。

在岩土工程的可靠度计算中，不仅基本变量有着自相关性，而且基本变量之间往往存在较强的互相关性。基本变量的自相关性应在参数统计时加以考虑，而基本变量之间的互相关性则应该在可靠度计算过程中加以考虑。基本变量之间，特别是土体的重度 γ、内聚力 c、内摩擦角 φ 之间，往往存在着较强的相关性。忽略这种相关性将给斜坡岩土体的可靠度计算结果带来偏于不安全的较大影响。

滑坡稳定性的概率分析是近年来才发展起来的岩土工程的可靠度分析的重要方法，它的基本思想是非确定论、非线性论(陈祖煜等，1988)，即把影响滑坡稳定性发展变化的一系列因素作为随机变量，建立各自的概率统计模型。这一技术思路符合系统工程地质的思想(Ladd and Foot，1974)，未来具有强大的生命力。目前主要分析方法有蒙特卡洛法、一次二阶矩法、中心点法、验算点法、函数连分式渐近法和 Hasofer－Lind 优化法。

1. 蒙特卡洛法

从概率的角度出发来求解失效概率，首先对影响可靠度的随机变量进行大量随机抽样，然后将这些抽样值逐个代入功能函数，累计功能函数值小于零的个数，由此确定失效频率。

2. 一次二阶矩法

属于水准Ⅱ级(Ⅰ级：半概率分析法；Ⅱ级：近似概率分析法；Ⅲ级：精确概率分析法)的概率方法。该法是将抗滑力和荷载效应作为随机变量(随机过程)，按给定的概率分布来估计失效概率或可靠指标，采用平均值和标准差两个统计参数，对设计表达式作线性化处理。一次二阶矩法(first－order second－moment，简称 FOSM)按随机变量的分布分为两种情况：

(1)不考虑随机变量的实际分布，假定它服从正态分布或对数正态分布，导出可靠度的解析表达式。由于分析时采用了泰勒级数在平均值(即中心点处)展开，故简称为中心点法。

(2)考虑随机变量的实际分布，将非正态分布变量正态化，再设计验算点作迭代，计算可靠指标、破坏概率，故称验算点法。此方法已由国际结构安全度委员会所推荐，也称 JC 法。

3. 函数连分式渐近法

当采用稳定系数 $F=R/S$ 作为状态函数时，特别是在 Bishop 法、传递系数法等常用的斜坡稳定性的分析方法中，稳定系数不再是随机变量的线性函数，而且有时所含随机变量可能以隐式形式存在，在这种情况下，状态函数对随机变量的偏导较难计算得出，一次二阶矩法不再适用。函数连分式的渐近计算法可以很好地解决此问题。函数连分式渐近法对于解决状态函数的隐式形式和非线性状态具有独特的优势，用该方法可以方便地求解出状态函数对随机变量的偏导数，求出滑坡稳定性的可靠指标和破坏概率。

4. Hasofer－Lind 优化法

需要全本请访问 www.ertongbook.com

Hasofer - Lind 优化法是 Hasofer 和 Lind(1974)首次提出的不变二阶矩可靠度指标 β,其对岩土工程领域的工程结构体系的可靠度计算产生了相当大的影响。在随后的工程实践活动中,新加坡南洋理工大学的 Low 对其进行了改进,计算环境采用基于 Microsoft 公司的 Excel 软件的规划求解器。在用 Hasofer - Lind 优化法求解可靠度指标 β 时,利用 Microsoft 公司的 Excel 软件的规划求解器进行优化求解,可避免求极限状态函数对基本变量的偏导数以及相关变量的独立变换这两个问题。

在求解过程中,用差分代替导数,省去了人工求极限状态方程对基本变量的偏导数的工作量。特别是当进行复杂问题的可靠度计算时,极限状态方程一般是基本变量的复杂函数,有时甚至是隐函数,且基本变量之间又可能具有较强的相关性,用规划求解器求解具有明显的优越性。甚至当基本变量是非正态分布时,同样可以利用 Excel 进行当量正态化。实际算例也证实了该方法的可靠性和高效性。

传统稳定性分析所定义的稳定系数概念是基于经验,符合逻辑的。然而,对于给定某一类型的应用,如斜坡长期稳定性(long - term slope stability)来说,普遍的做法是运用同一数值的安全系数,而不考虑计算中所涉及的不确定性。就传统上将同一安全系数运用于不确定的、变化较大的不同条件而言,确定性分析(deterministic analysis)是不合逻辑的。

可靠性计算提供了一种估算不确定性耦合效应的手段,也提供了一种区分不确定性高低条件(因素)的手段。尽管可靠度理论具有潜在价值,但是在边坡稳定性计算中还没有得到广泛应用。这可能源于两个因素:第一,可靠度理论涉及工程师尚不熟悉的一些概念和术语;第二,在大多数情况下,可靠度理论比以往传统方法需要更多的数据和更多的分析工作。

Wilson(1999)、Low(1997,2000)、Christian(1994)等都曾给出过很好的可靠度应用实例和清楚的理论描述。

第三节 滑坡防治

滑坡灾害的防治可分为被动和主动两种方式。主动方式是采取各种手段增加滑坡的抗滑力或减小滑坡的滑动力,使滑坡达到人们所企望的稳定状态,我们称其为滑坡治理;被动方式就是对当时处于稳定状态、将来的稳定性难以判断的滑坡采取监测预警措施,根据监测结果视情况处理,我们称其为滑坡预防。在早期生产力不发达,对滑坡的认识较为肤浅,且对滑坡的稳定性不能进行较为准确的评价的情况下,人们基本处于被动挨打的境地,只能在滑坡发生时寄希望于运气逃生。随着人类文明的进步、人类工程活动的加剧、人们对滑坡认识的不断深入以及生产生活的需要,对滑坡灾害的防治必须变被动为主动,不仅采取各种工程措施对滑坡进行主动治理,使滑坡灾害损失减小到最小程度,同时还将滑坡治理与当地经济社会发展密切结合,将滑坡治理的局部目标同区域整体发展利益密切结合。因此,滑坡治理被提上议事日程,治理的方法手段随着科技的进步和社会经济的发展得到不断提高和完善。

滑坡防治是一项综合性的系统工程。防治的基本原则是以防为主,防治结合,以最少的投资、最短的工期达到设计基准期内安全运行,并满足所有预定功能及安全性和耐久性要求。

滑坡治理工程又分非结构性和结构性两类:非结构性措施包括绕避、排水、减载回填、植被等;结构性措施包括支挡工程和滑带土改良(表 1 - 3)。

表 1-3 滑坡治理工程分类

类 型	亚 类	具 体 措 施
结构性	支挡工程	抗滑挡土墙工程(重力式挡土墙,悬臂式和扶臂式挡土墙,锚杆、锚索或预应力锚杆、锚索挡土墙)、悬臂式抗滑桩工程(挖孔抗滑桩和钻孔抗滑桩)、锚拉抗滑桩工程(锚杆、锚索或预应力锚杆、锚索抗滑桩)、支撑盲沟、格构锚固工程(锚杆、锚索或预应力锚杆、锚索格构锚固)和阻滑键工程等
	滑带土改良	化学注浆、旋喷桩、石灰桩、石灰砂桩、焙烧等
非结构性	绕 避	改移线路、隧道避开、桥梁跨越等
	排水工程	地表排水:滑体外截水沟、滑体内排水沟和自然沟防渗等
		地下排水:截水盲沟、盲(隧)洞、平孔群排水、垂直孔群排水、井群抽水、虹吸排水、支撑盲沟、边坡渗沟、洞、孔联合排水和电渗排水等
	反压工程	土堤(护道)、片石垛等
	减载工程	在滑坡的主滑段清方或清除滑体等

以三峡库区为例,滑坡是长江三峡库区发育最为广泛也是潜在危险性最大的一种地质灾害。由于三峡工程的建设可能诱发更多更大规模的滑坡灾害,迄今为止三峡库区成为我国在滑坡治理方面投入资金最大、最为集中的地区。滑坡防治的各种常规及先进性的非结构性和结构性措施基本上得到了广泛应用。

三峡水库是典型的河道型水库,水库按正常蓄水位 175m(吴淞系统)运行时,岸线长度 5 927km,干流库段平均宽度约 1.1km,淹没面积 1 045km^2,其中陆域面积 600km^2。根据国土资源部资料,整个三峡库区移民区共有滑坡、崩塌及危岩体 2 490 处,列入二期地质灾害防治、涉及 135m 水位及二期移民新址、在 2003 年 6 月以前采取防治对策处理的计有 581 处、592 个。其中,进行工程治理的 173 处、184 个,搬迁避让的 268 处,专业监测预警 127 处。二期共投入地质灾害防治经费 40 亿元人民币,保证了三峡库区 135m 水位按时蓄水。初步列入三期地质灾害防治的滑坡、崩塌 707 个,其中拟进行工程治理的约 335 个,拟进行专业监测的 122 处。三期拟投入地质灾害防治经费 65 亿元人民币,且已投入了近 50 亿元。以滑坡防治为主的地质灾害防治工作保证了三峡移民工程的顺利实施和三峡水库按期蓄水发电,成效显著。

在我国地少人多、土地资源弥足珍贵的情况下,滑坡防治的目标不仅在于减少,甚至避免滑坡灾害,同时还应兼顾改善当地的用地条件及人们的生产生活环境。因此治理措施应当因地制宜、灵活运用。例如在对三峡库区湖北省兴山县粮管所滑坡治理过程中,贯彻了扩大建设用地与滑坡治理工程相结合的方针,采用对主滑体挖方减载、阻滑段前沿填方阻滑的方案,既治理了滑坡,又增加建设用地近 10 公顷。移民迁建的峡口镇的一半就建在治理后的滑坡区内,确保了峡口镇按时完成迁建和三峡工程二期如期蓄水,取得了良好的经济效益,开创了三峡库区合理回填扩大建设用地的局面,在较大程度上缓解了迁建城市建设用地严重不足的局面。

应当看到,由于滑坡发生机理的复杂性,人们对滑坡认识的局限性,治理方法的针对性和可靠性必将受到一定的限制。因此,在滑坡防治过程中,在重视主动方式进行滑坡治理的同时切不可忽视被动防治方式。有些大型或特大型滑坡的治理或者经济效益太差,或者费用在当前经济条件下可能难以承受,此时采取"被动的"处理方式,如加强监测预警,根据滑坡变形情

况采取相应的对策可能更合适。如巴东新县城榨房坪滑坡位于巴东新县城规划区内，勘察成果表明，其为巴东组泥灰岩深层基岩切层滑坡，体积达 $559.0\times10^4\,m^3$，主要危及沿江大道及航运安全，推荐方案设计治理经费达 4 000 万元人民币。经专家论证，认为该滑坡深层滑动机理不太明确，稳定性难以准确判定。最终采用库岸护坡加监测的处理方案，节约治理经费达 3 000多万元人民币。如三峡水库运行期间产生滑坡，可架设桥梁跨越，二者相加总经费也不会超过推荐方案设计治理经费。这是三峡工程库区成功地“被动”处理滑坡的第一例。因此，滑坡灾害的防治是采用被动处理还是主动治理方式，应当视具体情况而定。今后滑坡防治工作应更多地关注“被动”处理方式。

第四节 本书的主要内容

本书基于极限平衡理论的条分法的基本原理，在对限制因素及存在的问题进行深入研究的基础上，分析了条分法主要计算方法（传递系数法、不平衡推力法、美国陆军工程师团法、斯宾塞法和摩根斯坦法等）的适应条件，指出了其优点和不足。针对目前采用累积求和的方法使条块满足静力平衡条件或同时满足静力与力矩平衡条件的各种具体方法中，当条块间出现拉应力时，所计算的稳定系数偏大，留下安全隐患的情况，提出了当滑体条块间出现拉应力时，令其等于零的必要条件，采用递推法推导了满足静力平衡条件的条分法的一般公式和同时满足静力与力矩平衡条件的条分法的一般公式。通过论证表明，现行条分法的各种主要计算方法是条块间作用力均大于零时相应递推法一般公式的特解。以递推法一般公式为基础，研究开发了具有自主知识产权的滑坡稳定性计算实用递推法和精确递推法。针对滑坡稳定性计算条分法的多解性与发散性及最危险滑动面自动搜索问题，开发了一套具有自主知识产权，以递推公式为基础，以实用递推法（SU－U 法）、精确递推法（SU－M 法）和改进的传递系数法为主体的多功能、多方法的软件。另外，对如何选取计算参数和考虑地下水压力等作为滑坡稳定性评价及进行滑坡治理求解滑坡推力时的重大问题，本书也做了较为详细的讨论。本书包含如下最新成果：

（1）采用递推法，导入当条块间作用力小于零时等于零的条件，对现行公认的条分法主要计算方法进行了改进，使得在滑动面确定条件下，计算机通过程序自动识别最危险区段，并分段计算其稳定系数成为可能，由此解决了以往条分法主要计算方法只能计算推移式滑坡的稳定系数，而不能正确计算牵引式滑坡稳定系数的问题。

（2）建立了改进的传递系数法。该方法属满足静力平衡条件的半精确条分法，修正了岩土工程规范推荐的传递系数法在进行滑坡稳定性计算的近似解法，同时克服了当条块间出现拉应力时稳定系数普遍偏大的现象，提高了滑坡稳定性计算精度，并使其具有更广泛的实用性。在应用现有规范的条件下，使滑坡防治工程更具有可靠性和安全性。

（3）基于极限平衡理论，推导了同时满足静力与力矩平衡条件的滑坡稳定性计算递推法的一般公式。在公式中，通过对滑坡体条块间垂直作用力和水平作用力的不同函数关系的假定，将现行公认的满足静力与力矩平衡条件的滑坡稳定性计算精确条分方法（Spencer 法、Morgenstern－Price 法 1、Morgenstern－Price 法 2、Morgenstern－Price 法 3 和 Morgenstern－Chen 法）统一到一起，并对上述方法进行了改进。通过构建条块间垂直作用力和水平作用力的函数关系：

$$f(\lambda,\alpha_i)=\lambda\left[\frac{\cos\alpha_i+\sin\alpha_i}{|\cos\alpha_i+\sin\alpha_i|_{\max}}\right]^{\eta}$$

建立了完全满足静力与力矩平衡条件的滑坡稳定性计算精确递推法(SU－M法)。该方法理论体系完备、精度高，收敛性优于前述其他同类精确条分方法，适应范围广泛，是精度完全满足工程要求的高精度条分法；同时，该方法将基本只用于土体滑坡稳定性计算的条分法扩展到岩质和岩土质滑坡的稳定性计算领域，应用前景更加广泛。

(4)基于极限平衡理论，导出了具有普遍意义的滑坡稳定性计算静力平衡递推法一般公式

$$E_m=\sum_{a+1}^{m-1}A_i\left(\prod_{j=i}^{m-1}\zeta_j\cdot\prod_{j=i}^{m}\frac{1}{\chi_j}\right)+\frac{A_m}{\chi_m}-\frac{1}{\mathrm{fos}}\left[\sum_{a+1}^{m-1}B_i\left(\prod_{j=i}^{m-1}\zeta_j\cdot\prod_{j=i}^{m}\frac{1}{\chi_j}\right)+\frac{B_m}{\chi_m}\right],$$

$$X_m=E_m\mathrm{tg}\theta_m$$

$$\mathrm{fos}=\frac{\sum_{a+1}^{n-1}B_i\left(\prod_{j=i}^{n-1}\zeta_j\cdot\prod_{j=i}^{n-1}\frac{1}{\chi_j}\right)+B_n}{\sum_{a+1}^{n-1}A_i\left(\prod_{j=i}^{n-1}\zeta_j\cdot\prod_{j=i}^{n-1}\frac{1}{\chi_j}\right)+A_n}$$

$$E_a\leqslant 0,0\leqslant a\leqslant n-1,\quad 1\leqslant m\leqslant n$$

在递推法一般公式中，通过对滑坡体条块间作用力合力倾角的不同假定，改进了现行公认的、满足静力平衡条件的滑坡稳定性计算半精确条分方法(不平衡推力法、美国陆军工程师团法、传递系数法、改进的传递系数法和简化的简布法等)，并将上述方法统一到一起。以此为基础，通过构建滑坡体条块间作用力合力倾角的函数关系

$$\theta_i=\frac{\cos\alpha_i+\sin\alpha_i}{|\cos\alpha_i+\sin\alpha_i|_{\max}}\gamma\qquad i=1,2,\cdots,n-1$$

建立了集简便实用、精度高、适应范围广的三位一体、满足静力平衡条件的滑坡稳定性计算实用递推法(SU－U法)。该方法适用于具有任何形状滑动面的土质、岩土质和岩质滑坡，克服了满足静力平衡条件的各种半精确条分法的诸多不足。进一步论证表明，该方法既克服了精确递推法计算繁琐的不足，又保证了其精度，在工程上具有广泛的应用前景。书中建立的一套与之相对应的滑坡防治工程安全等级划分，不同安全等级、不同工况条件下的安全系数体系对滑坡防治工程具有广泛的实用性。

(5)利用能量守衡原理，推导了地下水二维流的孔隙水压力计算公式，尤其是水库蓄水条件下的地下水二维流的孔隙水压力计算公式，解决了滑坡稳定性计算时孔隙水压力计算不准确所带来的误差。

(6)基于曲率半径最小的圆弧后沿最陡的切线只能小于或等于90°的条件，建立了既考虑均质岩土体也考虑存在软弱层、简便易行的最危险滑动面自动搜索系统。该系统可采用实用递推法(SU－U法)、瑞典圆弧法、毕肖普法、不平衡推力法、美国陆军工程师团法、传递系数法、改进的传递系数法和简化的简布法等进行最危险滑动面自动搜索。

(7)针对滑坡稳定性计算条分法的多解性与发散性及最危险滑动面自动搜索问题，开发了一套以递推公式为基础，以实用递推法(SU－U法)、精确递推法(SU－M法)和改进的传递系数法为主体，包含原有及改进的现行条分法主要计算方法的多功能、多方法的软件。该软件具有最危险滑动面自动搜索与计算指标反演分析、滑坡防治工程设计阻滑力计算与成图等多项功能，对难度较大的水库滑坡稳定性评价具有明显的优势。

实际上，书中的主要成果在三峡库区二期及三期地质灾害防治工作中得到了广泛应用。

将所研制的滑坡稳定性分析软件(LSTT)应用于三峡库区重大滑坡——万州滑坡群、云阳西城滑坡、巫山玉皇阁滑坡和奉节猴子石滑坡等的稳定性评价,解决了实际问题,效果良好。尤其是改进的传递系数法作为滑坡稳定性及滑坡推力计算方法已被纳入湖北省三峡库区地质灾害防治工作领导小组办公室发布的《湖北省三峡库区滑坡防治地质勘察与治理工程技术规定》中,应用于湖北省三峡库区二期地质灾害防治的滑坡稳定性及滑坡推力计算。计算软件作为水利部长江水利委员会原综合勘测局滑坡稳定性计算软件有效版本被广泛使用。

第二章　条分法的一般特点

第一节　几个基本概念

一、稳定系数与安全系数

有关滑坡或边坡稳定性评价及其防治方面的文献，对于稳定系数与安全系数的概念应用比较混乱，许多文献将安全系数与稳定系数混为一谈。早期很多学者将稳定系数称之为稳定安全系数，如毕肖普等将土坡沿整个滑动面的抗剪强度 τ_f 与实际产生的剪应力 τ 之比定义为稳定安全系数，而后来的学者，如陈祖煜(2003)、钱家欢(1984)等直接称其为安全系数。因此，有必要厘清稳定系数与安全系数的概念，以免给初学者的学习带来困难。

就单纯满足静力平衡条件而言，稳定系数可定义为沿可能滑动面上的抗剪强度 $\tau_f = c + f\sigma$（c 为内聚力，f 为摩擦系数）累积值与剪应力 τ 累积值之比值。在既满足静力平衡同时又满足力矩平衡的条件下，还应同时满足在此稳定系数条件下可能滑动岩土体对其重心的力矩平衡。从理论上讲，滑坡体或边坡在特定荷载下的应力、变形关系可以采用合适的数学模型如实表达(例如应力-应变间的非线性性质，卸荷增荷性质，屈服破坏性质等)。通过合适的数学模型可以精确合理地给出各点应力、变形值，从而得到滑坡或边坡稳定问题的精确解。就滑坡这种抗剪问题而言，可以得到每一点上的剪应力 τ，并求得每一点上的抗剪强度 $\tau_f = c + f\sigma$，同时可算出每一点上的局部稳定系数($\mathrm{fos} = \tau_f/\tau$)。如果每一点上的稳定系数 fos 均大于 1，整个滑坡在抗剪上是安全的。如果有个别点的稳定系数 fos 小于 1，则这些部位的 τ 将自动等于 τ_f，应力向临近点转移，这些部位进入屈服(甚至破坏)状态。由于这些屈服区是孤立的，局限于小范围内，没有形成连贯的破坏面，因此，在特定荷载下该滑坡仍是稳定的。相反，如果屈服的部位已经连成一个连贯性的破坏面，甚至得不到一个满足平衡要求的解答，说明该滑坡在特定荷载下已不能维持稳定。

由以上分析可知，从理论上讲，滑坡体或边坡的稳定系数 fos 是滑坡体或边坡岩土体沿整个滑动面的抗剪强度 τ_f 与实际产生的剪应力 τ 之比，临界值 1 为其安全系数。

由于滑坡体或边坡岩土体的不均匀性、物理力学性质的各向异性以及作用荷载不确定性等原因，实际上我们难以用一个或几个简单的数学模型精确合理地给出各点应力、变形值，从而得到滑坡或边坡稳定问题的精确解。某些情况下当稳定系数 fos 大于 1 时，滑坡在特定荷载下可能仍然是不稳定的。因此，我们必须根据计算过程中的荷载组合、所假定的边界条件和不同的计算方法以及保护对象的安全等级等，给出相对应的、大于 1 的经验值 K(安全系数)。当稳定系数 $\mathrm{fos} \geqslant K$ 时，我们认为滑坡体或边坡不会沿整个滑动面产生整体滑动，滑坡体或边坡有足够的安全储备，是安全的；当稳定系数 $\mathrm{fos} < K$ 时，不能保证滑坡体或边坡不会沿整个滑动面产生整体滑动，此时定义滑坡体或边坡是不安全的。此 K 值为经验值，而非计算值。我们将其定义为安全系数。

需要全本请访问 www.ertongbook.com