

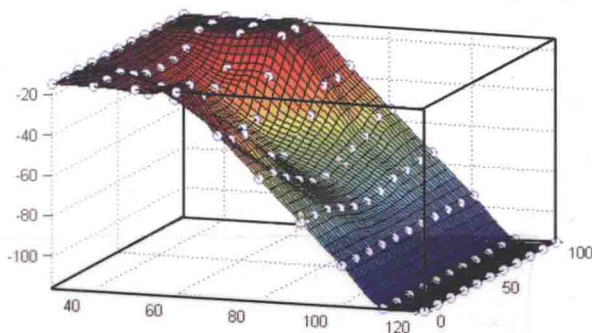


学 | 术 | 专 | 著

三维边坡最小势能稳定性 分析方法及程序

温树杰 著

Three-dimensional Slope Stability
Analysis Method and Program Based on
Minimum Potential Energy Principle



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

本学术著作获江西理工大学优秀学术著作出版基金资助

本学术著作是国家自然科学基金项目(51304084)、江西省自然科学基金项目(20151BAB206026、20122BAB216003)的研究成果

三维边坡最小势能稳定性分析方法及程序

温树杰 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

三维边坡最小势能稳定性分析方法及程序/温树杰著.
—长沙:中南大学出版社,2015.12
ISBN 978-7-5487-2139-0

I. 三... II. 温... III. 三维-边坡-稳定性分析
IV. U416.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第002100号

三维边坡最小势能稳定性分析方法及程序

温树杰 著

☐责任编辑 刘 灿

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙印通印刷有限公司

☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 8.5 ☐字数 170千字

☐版 次 2015年12月第1版 ☐印次 2015年12月第1次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2139-0

☐定 价 28.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

边坡的稳定状态,事关工程建设的成败与安全,并在很大程度上影响着工程的投资与效益。众所周知,自然界发生的失稳边坡实际上均是三维的,通过三维稳定性分析,理论上可以获得比二维分析更加符合实际的分析结果,从而减少不必要的损失与浪费。但是目前三维边坡稳定性分析理论还不完善,特别是三维分析方法与临界滑裂面的搜索是目前困扰研究人员的难题。

最小势能法是一种新的边坡稳定性分析方法,本书系统地介绍了三维边坡最小势能原理的稳定性分析方法及程序,可供从事岩土工程的研究人员及工程技术人员学习参考。书中的主要内容及创新成果有:

(1)针对任意形状滑裂面,建立了考虑剪切势能的三维边坡最小势能稳定性分析方法,并通过模型试验和算例对比分析,验证了该方法的合理性与可行性;

(2)对于抗滑桩加固边坡,考虑抗滑桩与坡体之间的相互作用,构建三维计算模型,提出了抗滑桩加固边坡三维最小势能稳定性分析方法;

(3)针对锚杆加固边坡,考虑了锚杆的弹性变形势能以及滑床上的剪切势能,提出了锚杆加固边坡三维最小势能稳定性分析方法;

(4)通过5个参数构建三维滑裂面,基于三维最小势能法建立搜索临界滑裂面的目标函数,利用遗传算法实现了三维临界滑裂面的搜索;

(5)开发了三维边坡最小势能稳定性分析程序,实现了边坡三维分析、滑裂面搜索及图形显示等功能,便于在工程中推广应用。

本书在撰写过程中得到了李铀教授的悉心指导,在此表示衷心感谢,另外也感谢阳军生教授、李驰教授、傅鹤林教授的审阅以及胡国保、罗惠、谭利民等研究生的协助。本书的出版也得到了江西理工大学优秀学术著作出版基金、国家自然科学基金项目(51304084)、江西省自然科学基金项目(20151BAB206026、20122BAB216003)的资助,一并感谢。

由于作者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

温树杰

2015年12月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 研究的背景与意义	(1)
1.1.1 研究的背景	(1)
1.1.2 研究的意义	(4)
1.2 三维边坡稳定性分析方法研究现状	(5)
1.2.1 极限平衡法	(5)
1.2.2 塑性极限分析法	(8)
1.2.3 有限元法	(8)
1.2.4 矢量和法	(9)
1.2.5 最小势能法	(10)
1.3 三维滑裂面构建与临界滑裂面搜索研究现状	(10)
1.3.1 滑裂面的构建	(10)
1.3.2 临界滑裂面的搜索	(11)
1.4 三维边坡稳定性分析存在的问题	(12)
1.5 本书的主要内容	(13)
第2章 二维边坡最小势能稳定性分析方法	(15)
2.1 引言	(15)
2.2 棱柱体模型的最小势能法	(15)
2.2.1 棱柱体模型	(15)
2.2.2 基本假定	(16)
2.2.3 理论推导	(16)
2.3 圆弧滑面的二维最小势能法	(19)
2.3.1 基本假定	(19)
2.3.2 抗滑力矩的推导	(20)
2.3.3 下滑力矩的推导	(21)
2.3.4 安全系数的求解	(22)
2.4 任意滑裂面的二维最小势能法	(22)

2.4.1	基本假设	(22)
2.4.2	抗滑力的推导	(23)
2.4.3	下滑力的推导	(25)
2.4.4	安全系数的求解	(25)
2.5	本章小结	(26)
第3章	三维边坡最小势能稳定性分析方法	(27)
3.1	引言	(27)
3.2	均质边坡三维势能的计算模型	(28)
3.3	均质边坡总势能函数的建立	(28)
3.3.1	滑裂面的弹性压缩势能	(29)
3.3.2	滑床的剪切势能	(29)
3.3.3	整个滑体的总势能	(33)
3.4	均质边坡安全系数的求解	(34)
3.4.1	抗滑力的推导	(34)
3.4.2	下滑力的推导	(35)
3.4.3	安全系数的求解	(35)
3.5	多层边坡的分析方法	(35)
3.5.1	多层边坡三维势能的计算模型	(36)
3.5.2	多层边坡三维势能函数的构建	(37)
3.5.3	多层边坡安全系数的求解	(40)
3.6	算例与分析	(42)
3.6.1	算例1	(42)
3.6.2	算例2	(46)
3.7	边坡模型试验	(48)
3.7.1	试验原理	(48)
3.7.2	试验材料与器材	(48)
3.7.3	模型方案设计	(48)
3.7.4	试验过程	(49)
3.7.5	试验结果分析	(52)
3.8	边坡参数对稳定性的影响分析	(55)
3.8.1	黏聚力的影响分析	(55)
3.8.2	内摩擦角的影响分析	(57)
3.8.3	坡比的影响分析	(58)
3.9	本章小结	(58)

第4章 抗滑桩加固边坡三维最小势能稳定性分析方法	(60)
4.1 引言	(60)
4.2 抗滑桩与坡体的相互作用	(60)
4.3 抗滑桩内力的计算方法	(61)
4.4 抗滑桩加固边坡三维势能的计算模型	(63)
4.5 抗滑桩加固边坡总势能函数的建立	(63)
4.5.1 桩与滑体相互接触处的势能	(64)
4.5.2 桩体的势能	(65)
4.5.3 整个系统的总势能	(67)
4.6 抗滑桩加固边坡安全系数的求解	(68)
4.6.1 抗滑力的推导	(68)
4.6.2 下滑力的推导	(69)
4.6.3 安全系数的求解	(70)
4.7 算例	(70)
4.8 抗滑桩的参数对边坡稳定性的影响分析	(71)
4.8.1 抗滑桩的抗弯刚度对边坡稳定性的影响分析	(71)
4.8.2 抗滑桩的间距对边坡的稳定性影响分析	(72)
4.9 本章小结	(73)
第5章 锚杆加固边坡三维最小势能稳定性分析方法	(74)
5.1 引言	(74)
5.2 锚杆加固边坡总势能函数的建立	(75)
5.2.1 锚杆加固边坡三维势能的计算模型	(75)
5.2.2 锚杆势能函数的建立	(75)
5.2.3 总势能函数的建立	(77)
5.3 锚杆加固边坡安全系数的求解	(77)
5.3.1 位移的求导	(77)
5.3.2 抗滑力的推导	(77)
5.3.3 下滑力的推导	(78)
5.3.4 安全系数的求解	(78)
5.4 滑体中锚杆相关数据的推求	(79)
5.5 算例分析	(80)
5.6 锚杆参数对边坡稳定性的影响分析	(82)
5.6.1 锚固力对边坡安全系数的影响	(82)

5.6.2 水平间距对边坡安全系数的影响	(82)
5.6.3 锚杆刚度系数对边坡安全系数的影响	(84)
5.7 本章小结	(85)
第6章 三维滑裂面的构建与临界滑裂面的搜索	(86)
6.1 引言	(86)
6.2 三维滑裂面的构建与目标函数的确定	(86)
6.2.1 三维滑裂面的构建	(87)
6.2.2 滑体数据生成	(89)
6.2.3 目标函数的确定	(89)
6.3 临界滑裂面的搜索	(89)
6.3.1 常用的临界滑裂面搜索方法	(90)
6.3.2 基于遗传算法的临界滑裂面的搜索原理	(92)
6.3.3 基于遗传算法的临界滑裂面搜索实现	(95)
6.4 算例	(101)
6.5 本章小结	(105)
第7章 三维边坡最小势能稳定性分析程序开发	(106)
7.1 引言	(106)
7.2 界面计算程序开发	(108)
7.2.1 计算模块	(108)
7.2.2 界面模块	(109)
7.2.3 计算模块与界面模块的结合	(111)
7.3 程序的实现	(112)
7.4 本章小结	(121)
参考文献	(122)

第1章 绪论

1.1 研究的背景与意义

1.1.1 研究的背景

由于地球的造山运动,以及地球表面本身的高低起伏不平,自然地理环境中存在大量的天然边坡,此外,土木、交通、水利等一些建设工程中的大量土石开挖及填筑都会产生许多边坡,因此,边坡广泛存在于自然地理环境和各种建设工程中。边坡由于其自身的倾斜,在自重或其他外荷载作用下,边坡整体具有从高处滑向低处的倾向。如果坡体内部某一个曲面上的下滑力超过土体(或岩体)抵抗下滑的能力,边坡就会丧失其稳定性,进而发生滑坡。

边坡普遍存在于人类的生活环境中,甚至是工程建设构筑物中不可或缺的一部分;边坡稳定问题已经涉及矿山、交通、水利水电等建设工程,其安全性也引起了业界的高度关注。我国幅员辽阔,是一个山多、雨雪天气多的国家,滑坡分布范围很广且发生的频率很高。表1-1是20世纪以来在我国发生的一些重大滑坡灾害实例^[1]。通过表1-1中的数据可以看出,边坡失稳产生的滑坡灾害会直接威胁人类的生命和财产,造成大量的人员伤亡、巨额经济损失和工程建设中断等事件。经统计分析,边坡失稳破坏所引起的滑坡已经成为除地震、火山之外的21世纪三大主要地质灾害之一,所以,边坡安全的评价与治理一直是科研与技术人员的重点研究方向之一。

表1-1 国内重大滑坡灾害实例

滑坡名称	位置	发生时间	体积 / 10^4 m^3	滑坡类型	诱发因素	备注
海原地震 滑坡	宁夏 海原县	1920.12.16	—	黄土斜坡	海原地震	诱发675个大滑坡,大量村庄被毁,死亡10万人
叠溪地震 滑坡	四川 茂县	1933.08.25	21000	三叠系 浅变质岩	7.5级叠溪 地震	摧毁城镇、村寨,死亡6800人,堰塞成湖

续表 1-1

滑坡名称	位置	发生时间	体积 / 10^4 m^3	滑坡类型	诱发因素	备注
查纳滑坡	青海共和县	1943.02.07	25000	第三系半成岩湖相地层	冻融作用	摧毁查纳村, 死亡 144 人
禄劝崩塌	云南禄劝	1965.11.22	39000	二叠系峨眉山玄武岩	长期蠕变	将老深多等五座村庄掩埋, 死亡 444 人
唐古栋滑坡	四川雅砻江	1967.06.08	6800	三迭系风化砂板岩	坡体长期蠕变	堵塞雅砻江 9 昼夜, 坝高 335 m, 溃坝 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$
盐池河岩崩	湖北宜昌	1980.06.03	15	近水平层状边坡	地下采矿	摧毁矿山, 死亡 284 人
鸡扒子滑坡	重庆云阳	1982.07.18	150	古滑坡(层状破裂)	暴雨	长江航道中断 7 d, 经济损失近 1 亿元
洒勒山滑坡	甘肃东乡	1983.03.07	3100	黄土盖层, 第三系泥岩	蠕变, 冻融	死亡 237 人
新滩滑坡	湖北秭归	1985.06.12	3000	古滑坡与崩积体(散体)	降雨	即时搬迁
铁西滑坡	四川喜德	1988.09.02	4	堆积层散体	暴雨	颠覆列车
溪口滑坡	重庆华蓥	1989.07.10	100	强风化碳酸盐岩	暴雨	死亡 221 人
头奈滑坡	云南昭通	1991.09.23	900	强风化玄武岩	长期蠕变	死亡 216 人
鸡冠岭岩崩	重庆武隆	1994.04.30	424	中-陡反倾边坡, 灰岩地层	地下采矿, 降雨	崩塌体入乌江, 形成近 10 m 的水位落差, 断流 0.5 h, 沉船 5 艘, 中断运输 3 个月, 经济损失近 1 亿元
黄茨滑坡	甘肃兰州	1995.01.30	200	黄土与白垩系泥岩斜坡		即时搬迁 1000 人

续表 1-1

滑坡名称	位置	发生时间	体积 /10 ⁴ m ³	滑坡类型	诱发因素	备注
二道沟滑坡	湖北巴东	1995.06.10	60	强风化斜坡泥灰岩, 泥岩	洪水位	死亡 5 人
老金山滑坡	云南元阳	1996.06.01	500	散体滑坡	采矿	近 200 人死亡
岩口滑坡	贵州印江	1996.07.18	1500	斜顺倾石灰岩滑坡	坡脚采石	堵江坝高 65 m, 形成长 8 km 堰塞湖, 数千人受灾, 失踪 3 人
易贡滑坡	西藏波密	2000.04.09	28000	基岩, 散体	融雪	形成堰塞湖, 淹没库区
兰坪滑坡	云南兰坪	2000.09.03	2000	顺倾边坡	暴雨	搬迁 5000 人
千将坪滑坡	三峡库区支流	2003.07.13	2400	砂泥岩顺层滑坡	水库蓄水	死亡 14 人, 损失 5735 万元
天台滑坡	四川宣汉天台乡	2004.09.05	2500	缓倾角顺层沙泥斜坡	暴雨	搬迁 1255 人, 滑坡坝高 23 m, 形成长 20 km 堰塞湖, 20000 人受灾
丹巴滑坡	四川丹巴县	2005.03.01	220	堆积层滑坡	长期蠕变及人工扰动	摧毁房屋, 损失 1066 万元, 同时威胁整个县城的安全

如图 1-1 和图 1-2 所示, 自然界发生的滑坡绝大部分展现出三维空间形态, 但在学术界中进行边坡稳定性分析应用最多的还是二维分析方法。为了更加准确地分析边坡稳定性状况以及更加真实、生动地反映边坡的实际破坏形态, 需要对边坡进行三维稳定性分析, 并且越来越多的工程实际问题提出了采用三维分析方法对边坡稳定性进行分析的要求^[2~3]。

此外, 为了防止边坡失稳、提高边坡的稳定性、减小滑坡灾害的影响、降低工程造价, 在工程中常常需要采用锚杆(索)、土钉、抗滑桩、挡土墙等加固措施来提高边坡的稳定性。通过三维稳定性分析可知, 加固边坡可以获得更加符合实际的分析结果, 从而减少不必要的损失与浪费, 但是目前针对加固边坡的三维稳定性分析方法较少, 工程中还没有较为成熟的方法。



图 1-1 某县一矿场的山体滑坡



图 1-2 某高速公路边坡滑塌

1.1.2 研究的意义

边坡失稳所造成的滑坡灾害已严重影响人类日常的生活与生产,人类与滑坡灾害作斗争也一直没有停止过,人们始终在寻求可靠的方法来减少滑坡灾害发生,开发滑坡灾害预测系统以及发展边坡治理技术等。在庞大而复杂的边坡工程中,边坡稳定性分析是其中涉及的一个分支,是理论性的基础,无论是在设计方面还是加固处置方面都离不开对其进行稳定性分析。因此,边坡稳定性分析理论及其计算方法一直是重要的研究方向。

到目前为止,对边坡进行稳定性分析通常是将边坡简单化,做一些假设,在平面内进行二维分析,但这并不很完善,尚没有办法估计由此带来的计算误差。而自然界发生的滑坡绝大部分呈现出三维空间形态,即使有些情况下边坡完全具备平面应变条件,但其破坏的滑裂面形状也还是空间曲面。因此,开展三维边坡稳定性分析研究具有重要意义。

在工程实践中,无论是边坡设计,还是边坡加固,一般均需要对边坡进行稳定性分析。工程中发生的失稳边坡绝大多数呈三维形态,三维稳定性分析可以更加真实地反映边坡的实际形态对边坡安全系数的影响,所以越来越多的工程实际问题提出了建立三维边坡稳定性分析的要求。例如洞口开挖边坡由于开挖只在一个有限宽度内进行,因此如果采用二维分析相当于假定开挖面是无限长的,显然与实际情况出入较大。又如边坡上的荷载只作用在一个区域内,而二维分析时将外荷载作为线性荷载无穷远作用于边坡上,这也和边坡的实际情况不符合。除此之外,如果地质条件复杂,仅靠二维分析很难准确地反映边坡的整体滑动情况,而且稳定性分析结果往往偏于保守,特别是对于一些需要治理加固的边坡,在设计时不得不提高安全储备,造成大量的浪费^[4]。陈祖煜曾对小湾水电站的锚杆加固边坡进行了二维与三维分析结果对比,结果表明:三维计算所需锚固力比二维

计算结果要少大约 $3.6 \times 10^6 \text{ kN}^{[5]}$ 。因此,对坡体进行三维稳定性分析,可以节省工程造价,减少不必要的浪费,对国民经济的发展具有重要意义。

目前,对于边坡的二维稳定性分析已经逐渐趋于成熟,但是三维分析还处于襁褓阶段,现阶段虽然取得了一些进展,但仍然存在较多需要解决的问题,完善边坡的三维稳定性分析刻不容缓。由于三维稳定性问题较为复杂,研究得尚不够深入,因此本书拟在已有工作的基础上对其进一步深入探讨和完善。

1.2 三维边坡稳定性分析方法研究现状

到目前为止,国内外的许多学者通过深入研究,提出了一些边坡三维稳定性分析方法,如极限平衡法、塑性极限分析法、有限元法、矢量和法、最小势能法等。下面对各种方法的进展作具体阐述。

1.2.1 极限平衡法

在边坡的稳定性分析中三维极限平衡法的大致思路如下:首先将边坡进行离散,使之成为一个含有边界的条柱并且假设为刚性,建立平衡方程,最后联立方程组,求解安全系数。但是所列的方程仍无法直接求解,因为方程的个数少于未知数的个数,为此需引入一些假设^[6]。Duncan^[7]查阅了1990年以前的20篇研究论文,将各种方法的特点与局限性分别进行了总结,见表1-2。

表1-2 三维边坡稳定性分析方法

研究者	计算方法	强度指标	限制条件	三维效应
Anagnoseti(1969)	改进摩根斯坦组 - 普莱斯法	c, φ	均无限制	有算例得 $F_3 = 1.5 F_2$
Baligh 和 Azzouz(1975)	改进圆弧法	$\varphi = 0$	简单边坡/旋转面	$F_3 > F_2$
Giger 和 Krizek(1975)	理想塑性的上限定理	c, φ	有角边坡/对数曲线	$F_3 > F_2$
Giger 和 Krizek(1976)	理想塑性的上限定理	c, φ	边坡网上坡项有荷载	$F_3 > F_2$
Baligh et al(1977)	改进圆弧法	$\varphi = 0$	简单加载边坡/旋转面	$F_3 > F_2$
Hovland(1977)	改进普通条分法	$\varphi = 0$	均无限制	某些情况下 $F_3 < F_2$

续表 1-2

研究者	计算方法	强度指标	限制条件	三维效应
Azzouz(1981)	改进圆弧法	$\varphi = 0$	简单边坡/旋转面	$F_3 > 1.07 \sim 1.3 F_2$
Chen 和 Chameau(1982)	改进 Spencer 法 有限元	c, φ	均无限制	Spencer 法与有限元 结果接近
Chen 和 Chameau(1982)	改进 Spencer 法	c, φ	均无限制	某些情况下 $F_3 < F_2$
Azzouz 和 Balight(1983)	改进瑞典圆弧法	$\varphi = 0$	坡顶同 B&A(1975), 坡顶有荷载	$F_3 > F_2$
Dennhardt 和 Forster(1985)	滑裂面假定	c, φ	边坡加载/无限制	$F_3 > F_2$
Leshechinsky et al(1985)	极限平衡 和变分法	c, φ	无限制	某些情况下 $F_3 > F_2$
Ugai(1985)	极限平衡 和变分法	c, φ	垂直边坡/圆筒形	$F_3 > F_2$
Gavounidis(1987)	极限平衡法	c, φ	无限制	$F_3 > F_2$
Hungr(1987)	改进 Bishop 法	$\varphi = 0$	无限制/旋转面	$F_3 > F_2 F_2$
Gens et al(1987)	改进瑞典圆弧法	c, φ	简单边坡/旋转面	$F_3 > F_2$
Leshchinsky 和 Mullett(1988)	极限平衡和 变分法	c, φ	有角垂直边坡/无限制	$F_3 > F_2$
Ugai(1985)	改进普通条分法 Bishop Janbu 和 Spencer 法	c, φ	无限制	$F_3 > F_2$, 普通条 分法除外
Xing(1988)	极限平衡法	c, φ	无限制/椭圆形	$F_3 > F_2$
Michalowski(1989)	塑性极限 动力分析理论	c, φ	无限制	$F_3 > F_2$
Seed et al(1990)	二、三维 Ad hoc 法	c, φ	特例: Kettleman 山破坏	$F_3 > F_2$
Leshchisky 和 Huang(1985)	极限平衡 和变分法	c, φ	无限制	$F_3 > F_2$

按照右手法则,建立如图1-3所示的空间坐标系,其中 x 轴负方向表示滑坡方向、 y 轴负方向分别与滑坡方向和重力方向相反。滑体中的中性面定义为滑动方向尺寸最大的断面,当滑面对称时,对称轴所在的平面就是定义的中性面。若对条柱不作假定,则每个条柱的受力分析如图1-4所示。

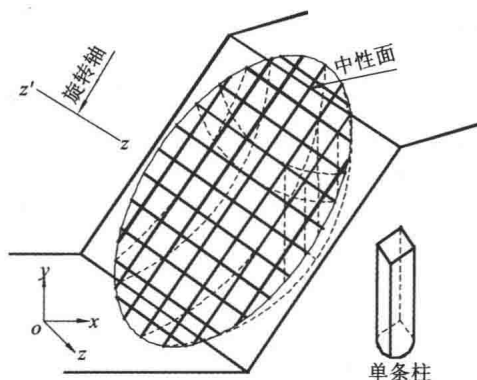


图1-3 三维滑体的条柱剖分

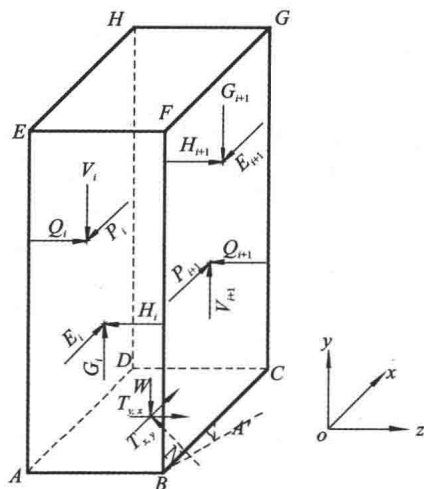


图1-4 条柱上的作用力

诸多学者通过构想不同的假定与方法确定边坡在三维分析时的稳定性安全系数。Hoviand^[8]采用条柱间的作用力为零的假设,对任意滑裂面的边坡进行了分析及计算;Chen等^[9]则基于各个条柱的作用力的方向为定值的假设,通过平衡方程求解稳定性系数;Lam等^[10]认为正应力与剪力存在某种函数关系,同时假定滑裂面上的正应力 $\sigma_a \leq 0$ 作用于底滑面的中心,稳定性系数的求解则通过力矩平衡(绕旋转轴的力矩)与力的平衡(滑动方向)确定;Hung^[11~12]提出了简化的三维Janbu法、Bishop法,这两种方法采用以下假设条件:其一, y 轴方向的剪力忽略不计;其二,滑裂面上的抗滑力与 xoy 面平行。Zhang^[13]则通过一系列的假定条件将自身的三维方法变成简单的Spencer法,该法采用以下假定:其一,破坏面为一个椭球面,不计剪应力;其二,条柱间的作用力与 x 轴的夹角均为定值,并且平行于 xoy 面;其三,使坡体底面受到一个端部力模拟三维效应。Huang^[14]不计各个条柱 y 轴方向的剪力,同时各个条柱的稳定性系数记为 F_{si} , F_{sx} 表示 x 轴方向的稳定性系数, F_{sz} 表示 z 轴的稳定性系数,并且二者对于任意条柱都是相等的关系,但是 F_{si} 不等,然后通过垂直方向与滑动方向的力矩平衡求得稳定性系数。冯树仁等^[15]则只通过 x 轴方向的平衡条件求解稳定性系数,而忽略了其他方向剪切力的影响。陈祖煜等^[16]提出三维分析方法,假定了底滑面的剪切力、行界面的

条间力以及列界面间的作用力等的方向,不仅满足坐标轴三个方向力的平衡,同时沿 z 轴方向的力矩也满足平衡条件。

我国研究人员在近期内对三维极限平衡法也做了大量的研究工作,进一步完善和发展了该方法。朱大勇等^[17]基于正应力在三维滑裂面上初始分布的假设,构想出较为简单的分析方法。陈胜宏等^[18]基于剩余推力法的基本原理,提出了一个由三维剩余推力法计算滑坡体安全系数的方法。郑宏^[19]提出了一种严格的极限平衡法的三维稳定分析,该法满足六个平衡条件。张均锋等^[20]发展了 Spencer 法,使其应用于三维分析,并且各个条柱的推力以及作用方向在纵横两个方向都已给出。陈昌富^[21]基于 M-P 法及假定条间力的方式,提出了一种三维边坡极限平衡分析法。迟世春、李亮等^[22]借助于三维简化 Janbu 法计算椭圆体滑裂面的坡体稳定性系数。戚顺超、凌道盛等^[23]在 M-P 法基础上提出了一种新的极限平衡法,该三维分析法使所有条柱均满足静力平衡条件,滑坡体满足力矩平衡。通常滑体底面与水平面具有一交线,罗先启、袁恒等^[24]基于抗滑力与该交线垂直的基础,通过引进条柱间的抗剪力的发挥系数,分析了边坡稳定性。

1.2.2 塑性极限分析法

塑性极限分析法分析边坡稳定时具有以下特点:其一,在坡体应力达到屈服之前,假设滑体为刚性体;其二,坡体达到塑性屈服时便会进入塑性发展阶段,进而坡体丧失稳定性。

通过继承与发扬二维塑性极限分析法,构想了该法的三维分析模型。Mcislawski^[25]把坡体划分为各个条柱,基于材料服从相关联流动法则和 Mohr-Coulomb 屈服准则的基础上,求解各个条柱的速度场,并且各块体的速度间断面与速度的夹角为内摩擦角,提出了一种适用于均质土坡的三维边坡稳定分析方法。陈祖煜等^[26-27]把滑坡体划分为具有机动许可的速度场的条柱,在设定材料服从相关联流动法则和 Mohr-Coulomb 屈服准则的基础上求解稳定性系数。但这种方法假定每一个条柱相对底滑面和相邻条柱均按摩擦角剪胀,这可能与实际情况不尽相符合。因此,2004 年陈祖煜^[28]又提出了一种更具广泛意义的满足非相关联流动法则的三维极限分析方法。王根龙等^[29]基于塑性极限分析法计算出了岩质边坡六面体滑楔的稳定性系数。颜天佑、李同春等^[30]基于上限定理,运用三维弹塑性法求解边坡稳定性系数。

1.2.3 有限元法

众所周知,边坡大多都是由应力应变很复杂的松散的或是块状岩土材料组成的,在外力作用下,不仅会表现出材料非线性,同时也会表现出几何非线性,如大应变、大位移等。由于没有全面考虑岩土内部应力应变关系,基于极限平衡,

理论所求的力可能并非坡体的实际力,分析的可靠性受到质疑。为此,自20世纪80年代以来,随着计算机应用技术的不断发展,考虑土体的非线性关系的有限元法应运而生并取得了很大的进展^[3]。有限元法具有以下优点:①弥补了极限平衡法某些方面的不足;②考虑了岩土体的应力—应变关系;③实现了边坡真正意义上的弹塑性分析。

所谓有限元强度折减法,就是降低岩土体的抗剪强度参数求解稳定性系数。Zienkiewicz 首先通过上述方式确定坡体的稳定性系数以及所能承受的极限载荷,但由于计算机技术的限制,无法准确计算而被同行专家否定。随着计算机技术的发展,1999年D. V. Griffiths等^[31]实现了上述构想并且取得了满意的结果,慢慢地该方法走进了岩土工程。宋二祥等一些学者^[32~36]引进该方法研究了二维边坡稳定性。方建瑞等^[37]则在前人的基础上采用强度折减法研究三维边坡稳定性,而陈国庆等^[38]也探讨了边坡的动态稳定性。年廷凯等^[39]基于强度折减法研究了复杂三维边坡在负载条件下的破坏方式及滑动机理。张科等^[40]探讨了三维边坡在不同条件下的破坏规律。但是,有限元强度折减法在边坡失稳评价标准、强度折减的范围以及三维方面的研究还有待进一步发展。

通过以上分析研究可知,建立在坡体真实的力学状态基础上的方法,才能准确地求解出稳定性系数。不需要任何迭代过程,便可以方便快捷地求出坡体的稳定性系数,这种思想的实质就是有限元法中的实际应力法思想^[41]。有限元实际应力法实际上就是采用有限元方法求解出离散单元的应力以及应变,然后通过相应的强度参数或指标,以此来锁定边坡发生失稳的区域位置以及确定发生破坏区域的扩展范围。同时,局部与整体的破坏通过某一桥梁将它们进行有机的结合,然后求解临界滑裂面的位置与形状,最后求得安全系数^[42]。伴随着计算机技术的发展以及计算水平的提高,学者们^[43~46]也采用有限元实际应力法分析了边坡的三维稳定性:如郭明伟等基于有限元法应力分析法提出了一种三维边坡稳定性分析方法;刘耀儒等基于三维非线性有限元方法计算了滑块的安全系数。

1.2.4 矢量和法

葛修润^[47]基于力的矢量特征,提出了矢量和分析方法,即基于滑面上的下滑力与抗滑力都是矢量和,最后通过它们在主滑动方向上的投影的比值求得矢量和法下的安全系数。刘艳章等^[48]为了反映边坡与坝基的真实受力状态,通过给出安全系数的计算方向,同时考虑了可能的滑动面方向,推导出了基于矢量和法的边坡安全稳定性系数的表达式。吴振君等^[49]基于通用条分法的思想上,通过滑体满足力和力矩平衡这两个严格的条件,将基于条分法的矢量和法的安全系数求出。后来,郭明伟等^[50]对于边坡的动稳定分析问题也采用矢量和法,由此得到在地震过程中边坡的安全系数与时间的关系,并绘制成曲线,因而可对边坡的动稳