

基于极限平衡理论的 土质边坡空间效应 研究及应用

The 3D Effect of Homogeneous
Slope Stability Analysis Based
on the Limit Equilibrium Method and Its Application to Engineering

卢坤林 朱大勇 王运敏 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

基于极限平衡理论的土质边坡 空间效应研究及应用

卢坤林 朱大勇 王运敏 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于极限平衡理论的土质边坡空间效应研究及应用/卢坤林,朱大勇,王运敏著. —武汉:武汉大学出版社,2016.12

ISBN 978-7-307-18796-2

I. 基… II. ①卢… ②朱… ③王… III. 土质—边坡—空间效应—研究 IV. TU432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 274936 号

责任编辑:刘小娟 李嘉琪 责任校对:杨赛君 装帧设计:吴 极

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:7.25 字数:142千字

版次:2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷

ISBN 978-7-307-18796-2 定价:36.00元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

自然滑坡与人工边坡失稳经常造成巨大的生命与财产损失,我国正值大规模经济建设高潮,在水利水电工程、交通工程、能源矿业工程、国土整治工程中涌现出大量复杂高边坡工程,合理、恰当地评价边坡稳定性显得尤为重要。

现实中发生的边坡失稳绝大多数呈现三维空间形态,边坡空间效应客观存在,广义的空间效应包括滑体形态效应和坡面形态效应两部分。由于考虑空间效应的三维边坡稳定性分析方法及最危险滑裂面搜索技术尚不完善,人们对空间效应的研究比较零散,未能开展系统的研究。对于相关工程而言,忽略空间效应并非总是偏于安全的,因此有必要系统地开展边坡空间效应的研究工作。

本书围绕边坡空间效应问题,从案例统计、理论分析、试验研究和工程应用四个方面对其进行了系统的研究:首先,从案例统计分析的角度研究了边坡的空间效应的构成与显著度;接着,从理论上提出了基于滑面正应力修正的二维及三维极限平衡分析方法,建立了均质边坡三维近似最危险滑裂面搜索方法,研究了土质边坡空间效应的形成机理,量化、分析了滑体形态效应和坡面形态效应,编制了空间效应的速查曲线;进而,根据底抬升模型试验验证了边坡效应理论成果的合理性;最后,开展了边坡空间效应的工程应用,取得了较理想的效果。著者将上述阶段性成果整理成书,以飨读者。另外,著者希望本书的出版能为边坡空间效应研究的进一步开展提供一个基础,起到抛砖引玉的作用。

全书共分为 10 章。第 1 章为绪论,主要介绍课题研究的目的和意义,三维极限平衡法、三维最危险滑裂面搜索技术以及边坡稳定性分析中的空间效应等方面的国内外研究成果综述,给出本书的研究思路和技术路线。第 2 章基于滑面正应力分布的严格极限平衡法,首先分析了滑面正应力的构成,通过类比经典土压力理论和 Spencer 的条间力假定,合理构造了滑面正应力的分布,根据整个滑体的平衡条件,建立了严格的二维极限平衡分析方法。第 3 章基于滑面正应力分布的三维极限平衡法,将第 2 章的研究思路拓展到三维空间,建立了满足 4 个平衡方程的非严格三维极限平衡法。第 4 章介绍均质边坡三维近似最危险滑裂面的搜索技术与安全系数曲线,对于均质边坡,建议了一种近似的三维最危险滑裂面的搜索方法,编制了一套均质边坡三维安全系数计算曲线。第 5 章为三维滑体形态效应分析,依据第 3 章和第 4 章的研究成果,分析了边坡滑体形态效应,探索了滑体形态效应的形成机理,编制了滑体形态效应修正曲线,从工程应用的角度建议了考虑滑体形态效应的界限标准。第 6 章为滑体形态效应对滑面参数反演的影响,建议了一种考虑滑体形态效应的三维反演分析方法,分析了滑体形态对滑面参数的反演结果的影响。第 7 章为坡面形态效应的模型试验研究,采用底抬升模型试验,研究了坡



面形态对边坡稳定性的影响规律,为后续理论成果验证提供了试验数据。第8章为坡面形态效应的理论分析,基于严格极限平衡法建立了圆形凸坡和凹坡的安全系数理论解答,并据此分析了坡面形态效应,编制了坡面效应的速查曲线,从工程应用的角度建议了考虑坡面形态效应的界限标准。第9章为工程应用,将本书的相关成果用于分析金坪子Ⅱ区蠕滑斜坡和新桥硫铁矿露天高边坡的稳定性。第10章为总结与展望,对本书研究内容进行了全面总结,对下一步研究的方向提出了建议。

在研究和撰写本书过程中,著者得到了国家自然科学基金(编号为41402256、51179043和51078123)、水利部公益项目(编号为201401063)、中国博士后57批面上基金项目(编号为2015M570533)和中钢集团马鞍山矿山研究院博士后基金项目(编号为2015BH-01)的资助;同时得到了合肥工业大学土木与水利工程学院的钱德玲、牛忠荣、张振华、姚华彦、汪鹏程等以及中钢集团马鞍山矿山研究院的吴同、周玉新、代永新、赵晓雨等的帮助,特此向他们表示深深的谢意。此外,书中引用了大量国内外相关专家、学者的研究成果,在此一并致谢。

由于书中尚有许多内容不太成熟,需要进一步探讨和研究,加之著者水平有限,书中多有不足之处,恳请读者批评指正。联系邮箱:hgd230009@163.com。

著者

2016年6月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 课题研究的目的及意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.2.1 三维极限平衡法	(3)
1.2.2 三维最危险滑裂面的搜索技术	(4)
1.2.3 边坡空间效应	(6)
1.2.4 基于滑面正应力修正的极限平衡法	(8)
1.3 拟开展的主要研究工作及技术路线	(10)
1.3.1 主要研究工作	(10)
1.3.2 技术路线	(12)
1.4 主要创新点	(13)
2 基于滑面正应力分布的严格极限平衡法	(14)
2.1 滑面正应力 $\sigma(x)$ 的构成分析	(14)
2.2 二维极限平衡法基本原理与分析过程	(18)
2.2.1 基本假定及滑面正应力	(18)
2.2.2 基本平衡方程及安全系数	(18)
2.2.3 滑体内力检验	(21)
2.3 算例验证与分析	(21)
2.3.1 算例 1	(21)
2.3.2 算例 2	(22)
2.3.3 算例 3	(22)
2.3.4 算例 4	(23)
2.4 滑面正应力分布对安全系数的影响	(24)
2.5 本章小结	(25)
3 基于滑面正应力分布的三维极限平衡法	(26)
3.1 三维极限平衡法基本原理与分析过程	(26)
3.1.1 分析模型及典型条柱上的作用力	(26)
3.1.2 基本假定	(27)
3.1.3 滑面正应力分布函数	(27)
3.1.4 三维滑体的平衡方程组	(28)
3.1.5 安全系数的求解	(29)
3.2 算例分析	(31)
3.2.1 算例 1	(31)
3.2.2 算例 2	(33)
3.2.3 算例 3	(34)
3.2.4 算例 4	(34)
3.3 本章小结	(35)



4	均质边坡三维近似滑裂面的搜索技术与安全系数曲线	(36)
4.1	三维滑裂面近似简化搜索方法	(36)
4.1.1	三维滑裂面的构造	(36)
4.1.2	三维滑裂面近似简化搜索流程	(37)
4.1.3	算例分析	(37)
4.2	均质边坡三维安全系数计算曲线及验证	(40)
4.2.1	计算曲线	(40)
4.2.2	与类似成果的比较验证	(43)
4.2.3	使用举例	(43)
4.3	本章小结	(45)
5	三维滑体形态效应分析	(46)
5.1	分析方案	(46)
5.2	滑体形态效应的影响因素分析	(47)
5.2.1	滑面形态	(47)
5.2.2	滑体长高比	(48)
5.2.3	坡比	(49)
5.2.4	黏聚力	(50)
5.2.5	内摩擦角	(50)
5.3	滑体形态效应的修正曲线及验证	(51)
5.3.1	滑体形态效应修正曲线	(51)
5.3.2	滑体形态效应的数值验证	(54)
5.3.3	滑体形态效应的试验验证	(54)
5.3.4	算例分析	(56)
5.4	滑体形态效应的形成机理及其界限标准	(58)
5.4.1	滑体形态效应的形成机理	(58)
5.4.2	考虑滑体形态效应的界限标准	(58)
5.5	本章小结	(59)
6	滑体形态效应对滑面参数反演的影响	(60)
6.1	考虑滑体形态效应的三维反演分析模型	(60)
6.1.1	滑带土体抗剪强度参数反演分析的定义	(60)
6.1.2	确定反分析的状态及稳定状态评估指标	(61)
6.1.3	考虑滑体形态效应的三维反演分析模型	(61)
6.2	算例及滑体形态效应对反演参数影响分析	(66)
6.2.1	算例 1	(66)
6.2.2	算例 2	(66)
6.3	本章小结	(68)
7	坡面形态效应的模型试验研究	(69)
7.1	试验装置及模型边坡	(69)
7.1.1	试验装置	(69)
7.1.2	模型试验用土性质	(70)
7.1.3	模型边坡的设计与制作	(70)
7.2	试验过程及测试结果	(71)

7.2.1	坡顶裂缝开展的描述	(71)
7.2.2	最终破坏的三维形态	(73)
7.2.3	失稳后的冲程	(73)
7.2.4	破坏时模型槽倾斜的角度	(74)
7.3	讨论	(75)
7.3.1	对滑面形态和位置的认识	(75)
7.3.2	对凹坡稳定性最好及凸坡稳定性最差的试验现象的力学解释	(75)
7.3.3	对试验中不足的认识	(75)
7.4	本章小结	(76)
8	坡面形态效应的理论分析	(77)
8.1	考虑坡面形态的极限平衡法	(77)
8.1.1	基本假定及合理性说明	(77)
8.1.2	圆形凸坡稳定性的极限平衡分析	(78)
8.1.3	圆形凹坡稳定性的极限平衡分析	(80)
8.2	模型试验验证和已有成果的比较分析	(81)
8.2.1	模型试验验证	(81)
8.2.2	与已有类似成果的比较分析	(82)
8.3	坡面形态效应分析及安全系数速查曲线	(84)
8.3.1	坡面形态效应分析	(84)
8.3.2	圆形坡面形态边坡安全系数速查曲线	(85)
8.3.3	算例分析	(85)
8.3.4	坡面形态效应适用范围的建议	(87)
8.4	本章小结	(87)
9	工程应用	(88)
9.1	金坪子Ⅱ区蠕滑边坡	(88)
9.1.1	工程概况	(88)
9.1.2	三维极限平衡分析模型	(89)
9.1.3	三维极限平衡分析结果	(91)
9.1.4	利用计算曲线图计算结果	(92)
9.1.5	对计算结果的评述	(93)
9.2	新桥露天矿边坡	(93)
9.2.1	工程概况	(93)
9.2.2	基本参数及计算断面	(94)
9.2.3	计算结果	(96)
9.3	本章小结	(97)
10	结论与展望	(98)
10.1	结论	(98)
10.2	展望	(99)
	参考文献	(100)

1 绪 论

1.1 课题研究的目的地及意义

边坡稳定性分析是岩土力学中的一个经典研究课题,在土木工程、水利工程及交通工程中具有深远的理论意义和广泛的工程应用背景。常用的边坡稳定性分析方法主要有:极限平衡法、极限分析法、滑移线场法和数值方法,等等。在上述方法中,极限平衡法仍然是当前和今后一段时间内工程界最常用的主流分析方法。

稳定性分析是判断边坡是否稳定、是否需要加固及采用何种加固措施的主要依据,是边坡工程中最基本、最重要的问题,也是边坡工程中需要迫切解决的问题之一。近年来,随着国家振兴战略规划的逐步实施,经济建设的战略重心也逐步向中西部转移,相关的公路、铁路、水利、港口、土木等行业工程建设中将会面临大量复杂的边坡工程问题,常规的二维极限平衡法已经不能满足此类复杂边坡工程稳定性评价的精度要求。

由于组成天然(人工)边坡的岩土体非均质性和坡体几何形状凹凸多变,绝大多数的边坡破坏形态均呈现典型的三维特征,或曲面,或平折面,或两者的结合。图 1-1 给出了一些实际边坡的破坏形态。

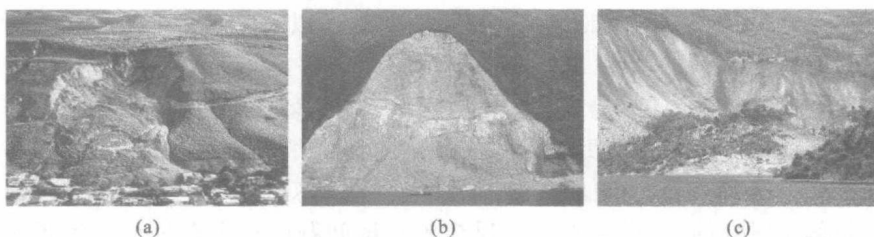


图 1-1 一些边坡破坏实例(引自网络)

(a) 美国加州的 La Conchita 滑坡;(b) 长江巫山段某滑坡;(c) 巴东县清太平镇滑坡

笔者收集了 522 个失稳边坡的案例资料,总结了长高比的分布规律,如图 1-2 所示,其中 82.4% 的长高比为 0.5~5.0,平均长高比为 3.08,而长高比大于 10 的仅占 3.4%。由此可见,无论是天然边坡还是人工边坡,其横向失稳长度并非无限长,而是在一定范围内,即边坡的破坏呈现典型的三维空间形态。上述规律说明边坡稳定程度受滑体形态及尺寸的影响,称为滑体形态效应。

同时,笔者还收集了 300 个破坏边坡的坡面形态资料,图 1-3 为其坡面形态的统计结果,其中凸坡 148 个(占 49.3%),平坡 112 个(占 37.3%),凹坡 40 个(占



13.4%)。可见坡面形态也会影响边坡的稳定性,称为坡面形态效应,其具体体现为在其他情况一致的情况下,凹坡稳定性较好,平坡次之,凸坡最差。

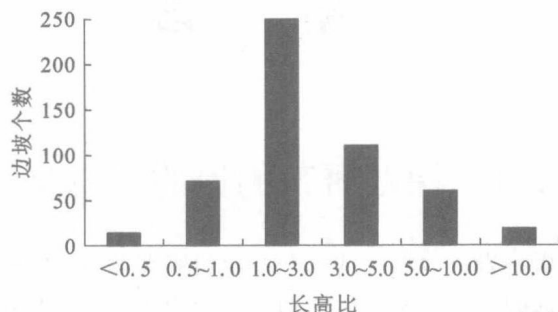


图 1-2 长高比的分布

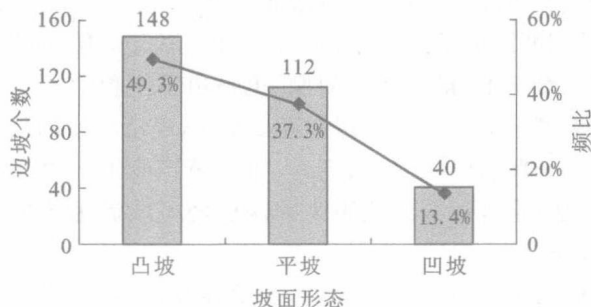


图 1-3 破坏边坡坡面形态统计

尽管开展三维稳定性研究非常有意义,但由于目前的计算手段和设计水平所限,大量边坡尚不能开展三维稳定性分析,一般都近似简化成二维边坡来分析。实际上,在二维滑面一致的情况下,不同滑体宽度、滑面空间形态及坡面形态均会对安全系数产生较为显著的影响,我们称之为边坡空间效应,主要包括滑面形态效应和坡面形态效应两部分。在工程界,边坡空间效应一直未能得到足够的重视,可能会造成极大的工程浪费,也可能存在安全隐患,因为忽略边坡空间效应的分析结果并不总是偏于保守的(如强度参数的反演等),该问题已经在多种场合被很多学者指出。

目前,在极限平衡理论框架下,三维极限平衡法及三维滑面搜索技术仍不完善,建立在此基础上的边坡空间效应研究就显得更零散和稀疏。因此,系统地开展边坡空间效应研究不仅有利于认识空间效应的形成机理及变化规律,评价二维安全系数的计算精度,还能够从工程应用的角度制作空间效应曲线图表,修正二维稳定性分析结果,提高评价精度。相关研究成果对重大复杂边坡工程的可行性论证、边坡工程的设计与校核、边坡稳定性的评估与防治等具有重要的现实指导意义。



1.2 国内外研究现状

在极限平衡框架下,研究边坡的空间效应主要受到三维稳定性分析方法和三维最危险滑面搜索技术这两方面的制约。因此,本节首先对三维极限平衡法和三维最危险滑面搜索技术方面的研究成果进行回顾,再对有关边坡空间效应的文献报道进行综述,最后对基于滑面正应力修正的极限平衡法的研究进展进行总结与归纳。

1.2.1 三维极限平衡法

严格来说,一方面边坡稳定性分析属于空间问题,采用三维分析方法更符合实际情况;另一方面,越来越多的工程实际问题需要开展三维稳定性评价。

现有的三维极限平衡法基本上都是二维极限平衡法的简单推广,将二维的条块拓展到三维的条柱,其分析方法的基本思路与二维的一致。Hovland^[1]最早提出了“条柱法”的概念,将二维瑞典条分法推广到三维分析。二维瑞典条分法精度本来就不高,推广到三维后精度更差,常出现三维安全系数低于二维安全系数的现象。Hung^[2,3]忽略了条柱间部分剪力,通过力矩平衡和力平衡建立了2种三维极限平衡法,可分别看作 Bishop 法和 Janbu 法的三维推广。Lam^[4]基于一般极限平衡法的假定,采用5种条柱间力函数及相应的尺度系数,提出了三维通用极限平衡法,但该方法计算量较大,且有收敛性方面的问题。Zhang^[5]假定滑动面为对称椭球面,将 Spencer 法扩展到三维。Huang^[6]也将 Bishop 法推广到三维,假设每个条柱底面的不同摩擦方向,由绕滑动和垂直滑动方向的力矩平衡得到安全系数。Chang^[7]根据实际破坏模式,采用楔块体划分为三维滑体,提出了一种三维极限平衡法,该方法计算过程比较复杂,不易掌握。Silvestri^[8]提出了无限长的黏土边坡球状破裂面的三维边坡稳定性分析方法,随后, Cai^[9]对该方法进行了改进。Zheng^[10]提出了一种类似 M-P 法假设的严格三维极限平衡法。Zhou^[11]也建立了考虑所有条柱作用力的严格三维极限平衡法。

国内方面,王家臣^[12]根据边坡渐进破坏观点出发,研究了岩土体为空间随机介质的三维边坡,建立了三维边坡渐进破坏随机分析模型;冯树仁^[13]提出了一种在滑动面为天然不连续面、剪切作用形成的球面、旋转椭球面和组合面的对称滑动面情况下,满足部分方向整体力平衡的三维极限平衡分析法,可看作是三维简化的 Janbu 法;陈祖煜^[14]提出了滑坡体满足4个平衡方程(3个力平衡和1力矩平衡),适用于任何滑动面形状的三维极限平衡分析方法,属于三维 Spencer 法;杜建成^[15]将不平衡推力法拓展到三维,并应用于实际工程,获得了较好的效果;郑榕明^[16]采用 Bishop 法的基本假定和边坡整体滑动方向,从另一个角度将 Bishop 法延伸到三维,能够计算对称与非对称的滑体;谢谟文^[17]将 GIS 空间数据分析功能与改进



的 Hovland 法相结合,提出了一种基于 GIS 的三维极限平衡分析方法;张均锋^[18,19]将严格 Janbu 法和 Spencer 法拓展到三维,新方法满足所有条块的力与力矩平衡条件,可适用于任何形状的滑面;李同录^[20]提出了一种改进方法,考虑了条间作用力和底滑面剪切力方向对边坡稳定性的影响,在假定条柱分界面也处于极限平衡状态的条件下,通过每一条柱三个方向的静力平衡条件,推导出边坡稳定系数的计算公式;陈胜宏^[21]拓展了不平衡推力法到三维的情况,并获得了较好的效果;顾晓强^[22]提出了一种满足每个条柱 3 个正交坐标轴方向上的静力平衡和整体绕平行于坡面纵轴的转轴的力矩平衡的三维极限平衡法;张常亮^[23]建立了边坡三维极限平衡法的通用形式,通过给定不同的限制条件,可分别得到三维瑞典条分法、三维简化 Bishop 法、三维简化 Janbu 法、三维 Spencer 法等三维极限平衡的具体算法;朱大勇^[24]摒弃传统的条柱法,将滑面的法向应力表达为一个瑞典法的法向应力和修正函数,建立 6 个平衡方程,首次得到了三维边坡的严格极限平衡法的解答;随后,郑宏^[25]采用类似朱大勇^[24]方法,也得到了三维边坡的严格极限平衡法的解答,并将 3D 极限平衡法归结为一个代数特征值问题,解决了安全系数的不收敛问题^[26];陈昌富^[27]通过了类似于 M-P 法的条间力假定,建立基于 M-P 法边坡三维极限平衡分析法。

表 1-1 总结了具有代表性的三维极限平衡法中的各种静力假定及满足的平衡条件(截至 2013 年)。

纵观已有的三维极限平衡法研究成果,为了使问题静定可解,各种三维极限平衡方法均引入大量的假定,而且许多三维极限平衡分析方法还对滑裂面的形状作了限制,如假定为左右对称,为对数螺旋面、球面、椭球面等,这些假定进一步削弱了该方法的理论基础和应用范围。另外,绝大多数三维极限平衡法还存在数值收敛性差、计算过程复杂的问题。与二维极限平衡法相比,三维领域内的极限平衡理论的发展还远未成熟,而且大部分研究工作都局限于学术领域,仅有极少数应用于实际工程中。

1.2.2 三维最危险滑裂面的搜索技术

在二维边坡稳定的垂直条分法领域,采用最优化方法确定临界滑裂面的问题基本上得到了较为圆满的解决。但在三维边坡稳定分析领域,任意形状滑裂面的构造与最小安全系数的确定仍是一个尚待解决的问题。

Thomaz^[28]采用随机方法初步实现了三维滑动面的搜索,但该方法常陷入局部最小;Yamagami^[29]和 Jang^[30]应用动态规划法搜索三维滑裂面,但计算理论欠严密,分析过程也非常繁复;Xie^[31]将 GIS 空间数据分析功能应用于分析三维滑面,获得了较好的效果;Cheng^[32]则采用曲线曲面的非均匀有理 B 样条和椭球面来拟合三维滑面,建立了三维滑面的搜索方法;Hajiazizi^[33]通过使用三维交替变量局部梯度法,实现了非球面的三维滑面搜索。

表 1-1 各种三维极限平衡法的比较与汇总

作者	条间剪力假设					整体力平衡			整体力矩平衡			滑面形态
	条柱底面在 z 轴分量	行界面		列界面		x 轴	y 轴	z 轴	x 轴	y 轴	z 轴	
		y 轴	z 轴	x 轴	y 轴							
Hungr(1989)	*	*	*	*	*	*	✓	*	*	*	✓	对称旋转面
Hungr(1989)	*	*	*	*	*	*	✓	✓	*	*	*	对称
Zhang Xing(1988)	*	条柱间所有力简化为平行 xy 面且具有相同倾角的作用力					✓	✓	*	*	✓	对称
Chen(1982)	*	✓	*	合力平行条柱底面		✓	✓	*	*	*	✓	对称
Lam(1993)	*	✓	*	*	✓	✓	✓	✓	*	*	✓	任意
Huang(2001)	✓	*	*	*	*	*	✓	*	✓	*	✓	至少部分球体
冯树仁(1999)	*	*	*	*	*	*	✓	✓	*	*	*	对称
陈祖煜(2001)	✓	✓	*	*	*	*	✓	✓	*	*	✓	任意
李同录(2003)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	*	*	*	任意
Chen Y M(2007)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	*	任意
朱大勇(2007)	假设滑面的法向应力为一个瑞典法的法向应力和含 6 个参数的修正函数						✓	✓	✓	✓	✓	任意
陈昌富(2010)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	*	✓	*	任意
Zhou X P(2013)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	任意

注:条间剪力假设一栏中,“✓”表示考虑此作用力,“*”表示忽略此作用力;整体力平衡和整体力矩平衡两栏中,“✓”表示考虑此作用力,“*”表示不满足此条件。



陈祖煜^[34,35]在这方面取得了可喜的进展,他提出基于极限分析的上限理论,应用最优化方法搜索三维滑裂面,最终得到三维安全系数上限解,并分析滑体内的破坏机制;谢漠文^[36]采用蒙特卡洛法建立了三维滑面的搜索方法;谭亮^[37]拓展了临界滑动场搜索技术,建立了对称破坏机制下的三维临界滑动场;毛谦^[38]将遗传算法引入三维边坡稳定分析中,假设滑裂面为椭球面,采用7个控制参数来模拟生成滑裂面,再运用遗传算法搜索边坡的最不利滑裂面;闫艳^[39]假设三维滑面为椭球面,基于滑面正应力修正的三维极限平衡法,编制了搜索程序,初步实现了三维最危险滑面的搜索及对应的安全系数;孙冠华^[40]基于岩土体极限状态下的等效塑性应变场和应力场,建立了解决三维边坡临界滑面确定方法,并得到了模型试验的验证;邓东平^[41]提出一种新的随机方法生成2条随机曲线(母线和准线),通过搜索由近似母线和近似准线形成的任意三维滑动面来找到最危险滑动面。

与二维相比,三维最危险滑面搜索的目标函数具有多自由度、多极值、高度非线性特点。对于此类复杂的优化问题,寻求安全系数的整体极值将变得非常困难,仅仅依靠常规的最优化方法是不能得到很好的解决。鉴于此,其在优化计算方法方面仍面临着巨大的挑战。

1.2.3 边坡空间效应

边坡空间效应主要包括滑体形态效应和坡面形态效应。

(1) 滑体形态效应

在三维最危险滑面尚不能确定的情况下,滑面形态效应包括端部效应和滑体相对长度效应两部分。

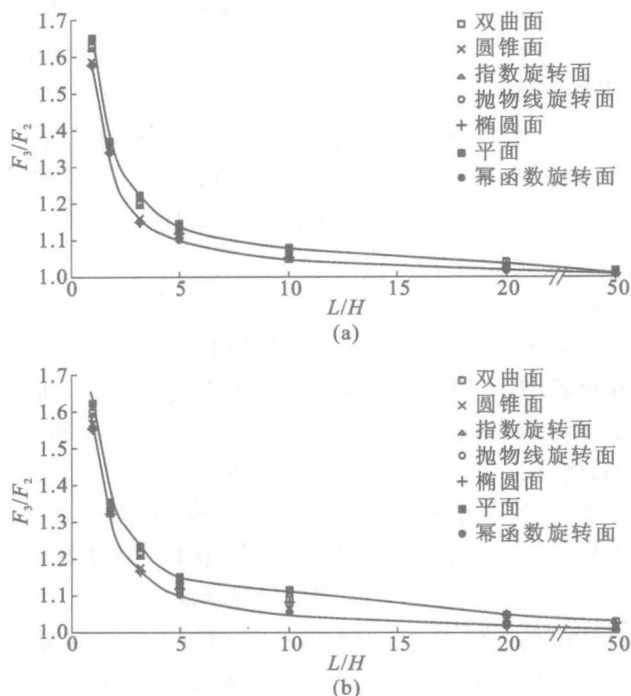
①端部效应。

边坡的二维与三维稳定性分析模型中最大的差别在于二维模型忽略了滑体端部对稳定性的影响。在三维滑面搜索技术尚不完善阶段,一般假定滑裂面的中部为圆柱面,端部为各种可能的曲面,计算出不同端部曲面下的安全系数,分析端部形态对安全系数的影响,Baligh^[42]、Gens^[43]及刘华丽^[44]均对此进行过探讨,代表性成果如图1-4所示^[43]。

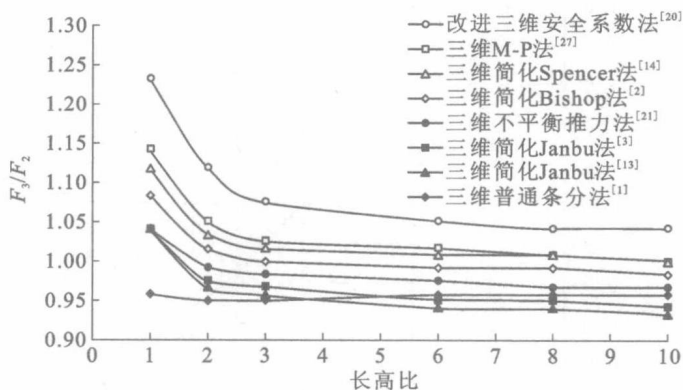
②滑体相对长度效应。

滑体相对长度效应通常采用潜在破坏边坡横向长度与坡高之比(简称长高比)来衡量,该指标常用来衡量边坡的空间效应,是影响空间效应大小的主要因素。一般来说,长高比越大,边坡空间效应越不明显。图1-5给出了常见三维极限平衡法下的滑体相对长度效应^[27]。

相关研究表明,滑体相对长度效应随着长高比的增大而迅速减小,所以一些学者们从工程应用角度来讨论能够忽略此效应的界限,如文献[42]~[45]均认为 $W/H \leq 10.0$,文献[46]认为 $W/H \leq 4.0$,文献[47]认为 $W/H \leq 8.0$,以及文献[39]认为 $W/H \leq 3.0 \sim 5.5$ 时滑体相对长度效应显著,应该予以考虑,否则会造成较大的误差。

图 1-4 端部形态效应(引自 Gens A^[43])

(a) 30°均质边坡;(b) 90°均质边坡

图 1-5 滑体相对长度效应(引自陈昌富^[27],有修改)

(2) 坡面形态效应

实际工程中的边坡表面形态常常呈现凸、凹及平等形式,在坡角一样的情况下,不同坡形会对边坡稳定性产生影响,称为坡面形态效应。

Baker^[48] 和 Farzaneh^[49] 分别采用变分方法和极限分析方法得出:圆形凸坡的稳定性随着 R/H 值的增大而降低, R/H 值趋向于无穷大时,与平面应变的计算结果相同,但其分析采用一般的三维滑动模式,即假定滑动体只向某一方向发生滑



动;Zhang^[5]讨论了凹坡的破坏模式并研究了三维稳定性分析方法,其大小与曲率比有关;Rassam^[50]研究了矿山废石堆形态对边坡稳定性的影响,研究表明,平面上呈凹形边坡的极限稳定坡角至少要比平面边坡大 2° ,凸形边坡的极限稳定坡角要比平面边坡小 0.5° ;Cheng^[32]采用非均匀有理B样条和椭球面来拟合三维滑面,建立了三维滑面的搜索方法,并讨论了坡面形态效应;Cala^[51]则采用数值方法讨论了圆形凸坡、凹坡的稳定性差异;Askari^[52]采用线性有限单元下限解法对圆形凸坡的地表形态效应进行了系统的讨论。

国内方面,王家臣^[53,54]研究了凸坡的破坏形态及其初步的破坏机理;朱乃龙^[55,56]对深凹岩质边坡的稳定坡角展开了系统的研究;孙冠华^[57]开展了圆形边坡失稳破坏模式的模型试验,并采用基于等效塑性应变技术实现了三维滑面的搜索;李列列^[58]以瑞典圆弧法和毕肖普法为基础,考虑了边坡的旋转半径和土条侧向土压力对边坡稳定性的影响,建立了三维外凸边坡稳定性分析方法;田钧^[59]采用了类似李列列^[58]的思路建立了内凹弯道边坡三维稳定性分析方法;赵衡^[60]通过三维数值分析表明圆形凸坡的破坏模式接近于轴对称破坏,采用一般的三维破坏模式会使计算结果偏于不安全,揭示了目前三维分析方法中滑裂面形状的假设并非总是合理,构建了轴对称条件下的容许速度场,得到了内摩擦角 $\varphi=0^\circ$ 时圆形凸坡临界坡高的上限解,同时提出了在轴对称破坏模式下计算圆形凸坡安全系数的极限平衡方法。

上述文献表明,坡面形态效应对边坡稳定性也有着较为明显的影响,图1-6给出了典型的坡面形态效应研究成果^[32]。

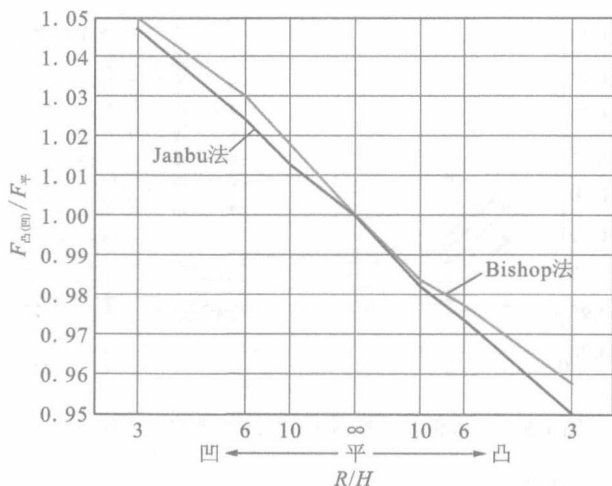


图 1-6 坡面形态效应(引自 Cheng Y M^[32],有修改)

1.2.4 基于滑面正应力修正的极限平衡法

极限平衡法一直是边坡工程中最常用的稳定性分析方法。在整个极限平衡法发展历程中,学者们一直将多余未知量的假设选在条间作用力或作用位置上^[61]。

对于严格的二维极限平衡法而言,这种处理方法尚能得到比较令人满意的安全系数,但有时也存在收敛性问题。对三维极限平衡法而言,这种研究思路已渐显不足,例如假设的合理性、力学的严格性和解的收敛性等。

Bell^[62]、朱大勇^[63,64]和郑宏^[65]等学者先后将研究视线转到滑面正应力的分布模式上来,成功获得了安全系数的显式解答。该方法与其他严格的条分法相比,求解过程更便捷,易于编程实现且不存在收敛性问题,能够很方便地推广到三维极限平衡分析中,突破了制约三维极限平衡法发展的瓶颈。

(1) 二维研究成果

Bell^[62]率先将滑面正应力分布假设为含两个参数的函数,成功地导出了以安全系数为变量的三元二次方程组并求解出安全系数;杨洪杰^[66]采用二次函数逼近滑面正应力分布,引入边界条件,实现了安全系数的求解,并将计算成果与其他极限平衡法比较,结果令人满意。

朱大勇^[63]假设滑动面的正应力分布是一个三次拉格朗日多项式,并由滑动面两端点和内部中间的两个点作为插值点,利用滑体的三个平衡方程条件推导出求解安全系数的方程,得到了安全系数显式解答;随后,朱大勇^[64]对滑面正应力的分布假设作了改进,他假设滑面正应力分布由初始函数和修正函数构成,初始函数可采用瑞典法或简化毕肖普法的滑面正应力,修正函数可采用含2个待定参数的线性插值函数,经过改进使滑面正应力分布假设具有一定的力学基础,假设模式形式化,求解过程简单化。

郑宏^[65]将以滑体为积分域的域积分转化成边界积分,提出了求解安全系数不需要再对滑体分条的无条分法;同时,根据微土条的平衡条件,推导了滑面正应力由滑体体积力(含面力)的贡献分量和条间作用力的贡献分量两部分组成,进一步明确了滑面正应力的力学构成。

卢坤林^[67]从力学平衡角度讨论了滑面正应力的构成,并在此基础上论证了两个分量的贡献大小,其中滑体体积力的贡献分量占主导位置,且为已知函数(瑞典法得到的正应力分布),而条间作用力的贡献分量仅占很小份额,为未知函数,可采用恰当的修正函数来拟合这部分分量。

刘华丽^[68,69]论证了滑面正应力假设模式和修正函数的选择模式对边坡安全系数的影响有限;Zhu^[63]和Zheng^[70]先后给出的详细解答过程也证明了安全系数解答的存在性。Zheng^[70]指出,安全系数解答存在且唯一的正实数解是能够证明的,但过程比较烦琐。另外,从目前各位学者^[62-71]研究成果来看,还未出现2个或更多非常接近、不易区分的安全系数解答。

表1-2总结了各学者对滑面正应力的假设模式。卢坤林^[67]通过算例分析各假设模式对安全系数计算结果的影响,结果表明各假设模式之间安全系数相差4%以内,进一步说明了在满足平衡条件和力学合理性的前提下,安全系数对滑面正应力分布不甚敏感。