

王国体 著

边坡稳定和滑坡分析 应力状态方法



科学出版社

内 容 简 介

本书是土木工程学科岩土力学方面关于岩土边坡稳定和滑坡分析的研究专著。本书系统地介绍了作者建立的边坡稳定分析应力状态新方法的数学力学模型,得到系列解析解的理论体系和应用分析的基础方法。全书共8章,内容包括:岩土边坡稳定和滑坡分析研究的历史与发展,岩土边坡的应力状态及变化,岩土边坡体内一点的应力状态和安全系数,边坡稳定和滑坡分析的数学力学模型与解析解,岩土边坡稳定分析应力状态方法解析解的应用,边坡稳定分析应力状态方法参数敏感性分析,环境条件下边坡稳定安全的影响及应用系列解析解进行应用程序设计的基础算法。

本书可供土木、水利、铁道、交通、环境等专业工程技术人员和研究人员使用,也可作为高等院校相关专业教师、研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

边坡稳定和滑坡分析应力状态方法/王国体著. —北京:科学出版社, 2012. 5

ISBN 978-7-03-034048-1

I. ①边… II. ①王… III. ①边坡稳定-应力状态-研究②滑坡-应力状态-研究 IV. ①TU4②P642. 22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 070306 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:刘小梅
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 4 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 4 月第一次印刷 印张: 7 3/4

字数: 140 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着人类活动的需求、工程建设的发展、环境条件的改变,涉及岩土边坡的问题日趋突出,边坡稳定和滑坡的分析研究已显得十分重要。一直以来,人们都认为滑坡产生的灾害与地震、洪水、疾病并列为威胁人类生存的四大灾害,因此,减少滑坡引起的灾害成为世界各国政府、科研机构、相关学者与科研人员所关注的研究热点。虽然工程边坡和天然岩土边坡的安全稳定、滑坡发生发展的过程十分复杂,但从滑坡的发生发展现象到认识滑坡发生的机制、机理、力学分析的角度出发,边坡稳定安全的数学力学分析与模型的建立,是边坡稳定和滑坡分析基础研究的关键课题。

作者在大学学习阶段首先接触到边坡稳定分析问题。随后,在长期的本科、研究生教学及科研活动、工程问题处理中,对岩土边坡从实际问题的感性认知发展到稳定分析的理性悟知。长时间磨炼、身体力行、不断追求、努力探索、积累储备,不断地充实和提高,为完成本书奠定了基础。作者回忆自己的学术历程,深感任何研究成果均来之不易,都要付出很多心血和汗水。首次参加的科研活动是灌区输水干渠的滑坡课题,所发表的第一篇论文就是土坡稳定分析条分方法计算程序设计,分析的第一个实际工程是斜拉码头的施工滑坡问题。数十年不倦努力和思索,对岩土边坡稳定分析有了一些自己的想法,结合实际研究工作进行了一些实践。近十年来,专注于岩土边坡的应力状态研究,针对边坡稳定和非稳定问题的滑坡发生发展,发表了一些论文,得到了一些关键性的初步成果——提出了岩土边坡应力变化的基本概念,得出了不同边坡应力状态的基本描述,建立了以岩土边坡应力状态描述边坡稳定的数学力学模型,并得到了边坡安全稳定和极限状态的系列解析解。现将这些成果汇集成书,与读者一起探讨。

本书包括以下内容：提出岩土边坡应力状态描述方法，建立边坡稳定和滑坡分析的数学力学模型，结合实际边坡进行的模型简化与论证，获得边坡稳定安全系数、极限坡高和极限坡角等系列解析解，应用分析有与现行各类方法的结果检验对比，解析式的参数灵敏度分析和环境条件下边坡分析，应用系列解析解进行的计算程序设计等。

在作者撰写本书的过程中，部分研究生做了一些相关的算例工作与文字工作；与此同时，得到科学出版社编辑的大力支持和帮助。没有他们的支持和帮助，本书是不能及时完成的，在此表示深深的谢意。

鉴于作者水平所限，本书难免有不足之处，恳请读者批评指正。

王国体

2012年3月16日

本书主要符号

σ_x	一点沿 x 方向的正应力, 以压为正, kPa
σ_y	一点沿 y 方向的正应力, 以压为正, kPa
σ_z	一点沿 z 方向的正应力, 以压为正, kPa
γ	岩土体的重度, kN/m^3
K_0	岩土体一点的侧应力系数, 无量纲
σ_1	一点的第一主应力 (大主应力), kPa
σ_2	一点的第二主应力 (中主应力), kPa
σ_3	一点的第三主应力 (小主应力), kPa
E	材料的弹性模量, kPa/m^2
μ	材料的泊松比, 无量纲
H	坡高, m
β	坡角, ($^\circ$)
σ_R, σ_h	边坡开挖岩土体重力在坡面上引起的卸荷应力, kPa
K	边坡应力状态参数, 受岩土土性和边坡性质的影响, 无量纲
δ_R	线弹性变形函数, 无量纲
K_1	弹性系数, 无量纲
K_r, K_p	盈利系数, 无量纲
σ	一点的应力向量
$\sigma'_{ij}, \sigma_{ij}$	应力矩阵, 也称一点的应力张量
λ	转换矩阵, 且为实对称矩阵
I	单位矩阵
τ_f	岩土体一点沿 σ 作用方向与其垂直向的抗剪强度, kPa
σ	岩土体一点某方向上作用的正应力 (压应力), kPa

c	岩土材料的抗剪强度参数, 黏聚力, kPa
φ	岩土材料的抗剪强度参数, 内摩擦角, ($^{\circ}$)
$\sigma_{\alpha}, \tau_{\alpha}$	分别为一点与主应力 σ_1 方向夹角为 α 的正应力和剪应力, kPa
$\tau_{f\alpha}$	主应力 σ_1 方向夹角为 α 方向上发挥的抗剪强度, kPa
α	一点的方向角, 逆时为正
F_d	一点的安全稳定系数, 无量纲
$\tau_{\max}$	一点的最大剪应力, kPa
τ_{fm}	对应于 $\tau_{\max}$ 的抗剪强度值, kPa
T_s	剪应力流量, kN
T_f	抗剪强度流量, kN
H_{cr}	极限坡高, m
β_{cr}	极限坡角, ($^{\circ}$)
F_s	岩土边坡稳定的安全系数, 无量纲
$u(z)$	孔隙水应力分布曲线
c', φ', γ'	岩土边坡材料的有效应力指标
f_0, f_c, χ	分别为初始下渗率、稳定下渗率和消退参数
k_E	地震系数, 无量纲

目 录

前言

本书主要符号

第 1 章 岩土边坡稳定和滑坡分析研究的历史与发展	1
1.1 岩土边坡稳定和滑坡灾害	1
1.2 边坡稳定分析方法的发展历史过程	2
1.3 岩土边坡稳定和滑坡的分水岭界限	5
1.4 岩土边坡整体稳定分析的数学力学模型的建立	5
1.5 岩土边坡稳定分析的应力状态方法	6
1.6 本章结论	7
参考文献	8
第 2 章 岩土边坡的应力状态及变化	9
2.1 弹性半空间土体的应力状态	10
2.2 开挖土体坡面卸荷应力形式	10
2.3 开挖土体卸荷应力公式一般形式的验证	11
2.3.1 卸荷应力公式形式的空间问题检验	12
2.3.2 卸荷应力形式的平面问题检验	15
2.4 岩土边坡应力状态的基本形式	16
2.4.1 卸荷应力的基本形式	16
2.4.2 一般岩土边坡的应力状态	17
2.5 本章结论	18
参考文献	19
第 3 章 岩土边坡体内一点的应力状态和安全系数	20
3.1 任意一点的应力状态描述	21
3.1.1 空间任意点的应力状态描述	21
3.1.2 三维应力状态下的应力转换	22

3.1.3	三向应力状态下的主应力	22
3.1.4	平面任意点的应力状态描述	23
3.1.5	空间一点的剪应力效应	24
3.2	岩土体材料的库仑抗剪强度定律	26
3.3	岩土抗剪材料的抗剪响应	26
3.3.1	岩土体任一点的抗剪响应	26
3.3.2	岩土坡体内一点稳定公式表达	28
3.3.3	岩土平面内一点稳定与非稳定的分水岭界限	30
3.4	岩土内一点安全的新定义——一点稳定的力学模型	30
3.5	本章结论	31
	参考文献	31
第4章	边坡稳定和滑坡分析的数学力学模型与解析解	33
4.1	基本思想	33
4.2	岩土边坡安全稳定的数学力学模型	34
4.3	边坡安全和滑动的数学力学模型的简化	36
4.4	一般岩土边坡的应力状态描述	38
4.4.1	半空间平面岩土体任意点的应力状态	38
4.4.2	平面边坡的“卸荷应力”状态	38
4.5	岩土边坡安全稳定和极限状态的解析解	39
4.5.1	安全系数公式	39
4.5.2	岩土边坡的极限状态解析解	40
4.5.3	理论公式的检验与讨论	40
4.6	本章结论	42
	参考文献	43
第5章	岩土边坡稳定分析应力状态方法解析解的应用	44
5.1	二维边坡研究算例	44
5.1.1	分析研究的算例	44
5.1.2	应力状态方法与有限元强度折减法的计算结果比较	45
5.1.3	结果分析	46
5.2	对极限坡高、坡角的计算	47

5.3	极限坡角公式应用分析	48
5.4	典型算例的分析	49
5.4.1	边坡稳定分析考核算例	49
5.4.2	边坡坡面简化分析算例	51
5.4.3	工程算例	52
5.4.4	实际边坡分析集合算例	53
5.5	本章结论	55
	参考文献	56
第6章	边坡稳定分析应力状态方法参数敏感性分析	57
6.1	岩土体的重度变化对边坡稳定安全系数的敏感性分析 ...	58
6.1.1	重度变化的敏感性	58
6.1.2	重度变化的敏感性影响算例	59
6.2	内摩擦角变化对边坡稳定安全系数的敏感性分析	62
6.2.1	内摩擦角变化的敏感性	62
6.2.2	内摩擦角变化的敏感性算例	63
6.3	凝聚力敏感性分析	66
6.3.1	凝聚力的敏感性影响	66
6.3.2	凝聚力变化的敏感性算例	66
6.4	应力状态参数的敏感性分析	69
6.4.1	应力状态参数的敏感性	69
6.4.2	应力状态参数变化的敏感性算例	70
6.5	边坡极限坡高的敏感性分析	73
6.6	极限坡角敏感性分析	75
6.7	本章结论	76
	参考文献	76
第7章	环境条件下边坡稳定安全的影响	77
7.1	边坡稳定和滑坡分析的理论判断	77
7.1.1	解析解应用形式	77
7.1.2	边坡稳定与极限状态的判定准则	78
7.2	孔隙水应力条件下边坡稳定安全系数的解析公式	79

7.3 降雨对边坡稳定的影响分析	80
7.3.1 岩土体入渗的基本机制	80
7.3.2 天然降雨描述	80
7.3.3 降雨入渗的机制分析	81
7.3.4 自然条件下土体下渗能力与降雨强度的关系	82
7.3.5 降雨对岩土边坡稳定的参数影响	83
7.4 地震作用对岩土边坡的影响	83
7.4.1 地震对结构物体的影响	84
7.4.2 中国地震设防的区域划分和地震系数	84
7.5 环境影响条件下边坡稳定分析算例	85
7.5.1 孔隙水应力分布	85
7.5.2 复杂环境下边坡稳定分析	87
7.6 本章结论	87
参考文献	88
第8章 边坡稳定应力状态方法的分析程序	89
8.1 概述	89
8.2 边坡的破坏曲线及其绘图程序	89
8.3 利用 GUI 用户图形界面进行系数响应分析	91
8.3.1 “STRESS-SLOPE” 程序功能介绍	93
8.3.2 “STRESS-SLOPE” 程序的使用	94
8.4 “应力-边坡” 源程序	97
8.4.1 程序界面的初始化	98
8.4.2 安全系数的求解	99
8.4.3 破坏曲线的绘制	100
8.4.4 安全系数的响应分析	102
8.5 本章结论	110
参考文献	111

第1章 岩土边坡稳定和滑坡分析研究的历史与发展

1.1 岩土边坡稳定和滑坡灾害

岩土边坡总体上可分为天然边坡和人工边坡。天然边坡是指在地球形成的漫长历史长河中，地壳岩层在内力和外力地质作用下经历长期的、系列的、复杂的运动演变过程而形成的各种类型的地质构造和地形地貌的现状，并以复杂多样的各类岩土构成其不同的天然形式坡体。人工边坡是由于人类建设、生产生活、社会活动、物质交流等所构建的不同形式的边坡，如各类路基边坡，各种水库的土坝、石坝、混合坝，大小江河水道的堤防，各个单体工程建设基坑与支护形式等。这些天然边坡和人工边坡，作为结构体具有构成的历史烙印，形式多样、功能各异，是典型而特殊的构成、构筑的结构形体。

岩土作为构成边坡主要的材料，其组成成分复杂、性质易变、区域性强。岩土材料作为地球表面普遍分布的材料形式，与地球形成一样有着复杂、深刻的内涵和历史。我们发现的所有的物质元素和矿物成分，都可以在岩土材料中找到。此外，在自然环境和人为环境条件下，岩土边坡从稳定到失稳再到出现滑坡的发展过程十分复杂，既有边坡组构的具体形态多样性，又有岩土材料组成性质复杂性，更有环境条件影响的可变性，因此，岩土边坡的稳定分析和滑坡判定是一个世界性的研究难题。

岩土作为构成边坡材料的集合体，其稳定的过程具有动态特征。从人类生存、生活、发展的条件出发，我们希望各类岩土边坡在一定的时域内保持稳定，不会给人类生产、生活、社会的稳定和可持续发展带来影响。然而，各类岩土边坡的失稳和产生滑坡的问题依然不断

涌现。滑坡灾害和地震、疾病、洪水灾害一起,被认为是威胁人类生存的四大灾害^[1~3]。任一重大滑坡的发生,都会造成人员的重大伤亡、财产的重大损失,并对当地经济发展产生深远的负面影响。当前,各类滑坡的灾害在政府文件、新闻报道、书籍期刊、研究论文中频频出现,其已成为网络搜索具有较高词频的热点词汇之一,社会对其关注、重视、研究的程度由此可见一斑。

1.2 边坡稳定分析方法的发展历史过程

研究岩土边坡的稳定问题可以追溯到 19 世纪 20 年代,建立在极限平衡理论基础上的假定圆弧分析方法是边坡稳定分析定性定量研究、应用、发展的基线^[1~5]。以下不妨简要回顾边坡稳定分析计算的假定圆弧法及其演变和发展过程,可见该研究的历史演变和局限性。

1916 年,瑞典本·彼德森(Ben Bidson)首先提出假定任意空间一点为滑动中心,假定边坡出现圆弧整体滑动,应用库仑(Coulomb)抗剪强度定律,计算在滑动面上的滑动力矩和抗滑力矩,定义边坡稳定安全系数,为岩土边坡稳定分析奠定了圆弧法的基础。由于假定任意圆弧为可能滑动面,涉及滑动中心和滑动面的位置,带来的是繁杂的计算工作量;整体圆弧滑动分析难以符合实际边坡,随后出现对整体滑动进行分条计算,是先期研究的重点。

1927 年,费伦纽斯(Fellenius)经过十分繁杂的计算,给出了滑动中心的范围,大大减少了假定圆弧滑动中心所带来的计算量。

1947 年,太沙基(Terzaghi)提出分条计算,形成条分法。

1950~1955 年,毕肖普(Bishop)提出对分条考虑条间力的形式,包括孔隙水应力,定义分条不同的安全系数,并给出考虑条间力简化的公式和计算边坡稳定安全系数计算的迭代算法。

随后,研究最危险的滑动面成为条分法的标志性象征,对分条的条间力的各种假设成为条分方法的研究动力。同时,计算机技术的发展与程序设计、应用软件的开发,也为条分方法的实现、应用与发展

奠定了分析计算的基础。

1954~1973年,研究条间力的典型代表简布(Janbu)认为,条间力的水平方向的作用力,对边坡稳定影响较大。在以已知滑动面为基础,假定条间力为水平方向的作用力,分条的各个土条满足受力的竖向和水平向平衡、力矩平衡,建立条分方程组的“普遍条分法”,也称传递系数法或水平推力法。

1965~1980年,从细分土条到微分土条,斯宾塞(Spencer)、摩根斯坦(Morgenstern)与普赖斯(Price)、沙尔玛(Sarma)等对分条的条间力进行了不同假设,建立了条间力平衡方程组和数值求解的各种条分方法。

1983年,陈祖煜以微分土条为基础,建立了一套普遍条分的数值求解方法和应用程序的设计软件。

这样,岩土边坡稳定分析的分析方法——基于假定滑动面的条分法、进行分析程序设计、应用软件的开发代表着发展方向和应用水平。

近年来,模糊数学、遗传算法、可靠度分析、信息熵等新方法应用于边坡稳定分析的研究也逐渐成为探讨研究的热点。

总之,岩土边坡稳定分析的确定性计算方法主要是假定圆弧或滑面、细分土条,已有近百年的历史。一代代学者在以探讨假定滑动面为基础的前提下,通过细分土条、条间力假定做了很多工作,但由于细分土条和条间力的考虑,使得所建立的各分条平衡方程组出现的大量多赘未知力难以解决,不得不对条间力的大小、分布、作用位置进行种种假设,才能进行边坡稳定安全系数的数值求解。这样,岩土边坡稳定分析的安全系数是在假定滑动面、假定条间力分布形式基础上的计算结果,才使得在实际工程应用中出现许多不符合实际的状况。

岩土实际边坡稳定分析结果与实际相比的不符合,除了众多可列出的原因之外,在理论上,主要归因于条分法所表现出的一些不足或缺陷,具体体现在以下三个方面:

(1) 条分法应用极限平衡理论是建立在假定圆弧、滑动面或其他

形式的滑动面基础上的,这也是条分法发展重要依据的出发点和结果的显示点,其试图通过不同滑动中心的位置假定、不同滑动半径的假定得到的滑弧或滑动面,将边坡坡体实际可能出现的滑动形式包含其中,通过有不同滑动面形式的假定在计算方法上全部实现,找到所对应的最不安全的滑动面作为岩土边坡稳定的界定形式,成为边坡稳定的判定标准。基于岩土边坡的不同特征和岩土组成材料的复杂性,将岩土边坡稳定和滑动用圆弧滑动面处理表述,难以符合岩土边坡的实际工作状态。

(2) 条分方法初始是由整体圆弧滑动引入刚体假说,将土体重力集中延伸到假定滑弧的点上,然后发展到对分条应用平行力系的平衡方程来研究条间力,进而对土条按极限平衡方法建立平衡方程组,为了解决多余未知力,又进一步假定条间力的各种形式,最后提出、应用各种算法求解。这是将重力建立在刚体力学的基础上,即重力集中在质心处去研究刚体分条的内力(分条的条间力)分布。换句话说,研究刚体的内力及其分布假定形式,依据刚体力学平衡原理,是没有意义的。

(3) 岩土材料抗剪强度应用的库仑抗剪定律,是边坡稳定对岩土材料强度分析应用的主线。条分法的分条、微分到各点处发挥作为对剪应力作用的响应,只是考虑在滑弧上该点的切线方向上的抗剪强度。按照莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)准则,确定一点应力状态在沿该点各个方向上由于应力大小不同、各个方向上的抗剪强度的响应也不同,其在滑弧点的切线方向的抗剪强度仅仅是该点抗剪响应数值形式的一种,条分法对抗剪强度莫尔-库仑准则的处理应用,这本身与莫尔-库仑准则是相悖论的。

依据以上三点,即条分方法由于其假定滑动面形式难以符合实际、条间力的各种假定内力刚体平衡的形式、材料抗剪强度发挥值限定在滑弧点的切线方向上的缺陷,使得计算岩土边坡稳定分析所得到的安全系数,由于在理论依据上的不足,造成与实际边坡稳定性的不符^[6,7]。

1.3 岩土边坡稳定和滑坡的分水岭界限

虽然岩土边坡的构成形式、组成材料和受外部环境影响的因素众多,准确分析岩土边坡稳定性及滑坡分析均十分困难,但是,任何滑坡现象的发生都是具有深刻的背景条件和一定的时间响应的,出现滑坡的现象是有一个从稳定到非稳定的发展过程。滑坡实质现象过程可基本描述为:从岩土边坡内任意一点出现非稳定发展到破坏→由点逐步扩展、扩大→形成部分区域非稳定→发展到局部、整体破坏→出现滑动的全过程。从理论分析方法的研究角度出发,边坡稳定在出现任意一点的非稳定之前,即岩土边坡整体稳定到出现内部任意一点的破坏是边坡整体稳定到滑坡出现的分水岭界限。这一分水岭界限表明,在理论上如果能够建立一个反映岩土边坡整体稳定性完美的、合适的理论分析模型,不仅对边坡稳定有着极其重要的意义,对滑坡的发展、发生也具有重要的指导意义,这是因为滑坡的产生过程虽然复杂,但却需要一定的发展时间历程,这就为减少滑坡灾害留下了应急响应的时间和空间。

1.4 岩土边坡整体稳定分析的数学力学模型的建立

如前所述,虽然岩土边坡稳定分析具有复杂性,但是从力学分析的角度出发,边坡稳定是对边坡结构的力学效应和坡体岩土材料的强度响应的研究,是边坡处于稳定状态和出现滑坡的力学、材料本质问题。据此,研究边坡稳定和滑坡发生,建立岩土边坡稳定分析的数学力学模型应注意到以下根本点^[8,9]:

- (1) 边坡稳定到滑坡发展主要是剪应力效应行为。
- (2) 岩土材料是剪切响应材料。
- (3) 边坡结构具有其特殊形式,对重力响应的边坡应力状态具有特殊性。

(4) 岩土土体具有其特殊的土性, 如历史性、记忆性和信息性。

(5) 边坡稳定属于边坡的小变形问题, 滑坡的发展到发生属于大变形问题。

(6) 以边坡应力状态、岩土材料的强度为特征研究边坡稳定问题, 以变形特征研究边坡非稳定过程的发展。

以上岩土边坡稳定和滑坡研究的根本特点, 以及基于假定滑动面的边坡稳定分析条分方法近百年来边坡稳定研究的历史表明: 一方面, 建立一个科学的、完美的、实用的岩土边坡稳定分析的数学力学模型还是十分困难的, 另一方面, 科学崇尚简洁, 由边坡稳定、滑坡发生的物理现象抽象出本质问题并非越复杂越好, 而是力求简单明了; 模型要完美体现真实本质, 建立的边坡稳定的数学力学模型求解要能够实用方便, 建立的边坡稳定数学力学模型的求解过程不是越难越好, 而是力求具有解析的具体形式, 这是因为解析解是解决实际问题最为方便的形式之一。

对于岩土边坡稳定分析、非稳定发展到滑坡的问题研究, 首先必须解决边坡稳定分析的数学力学模型的建立问题。

1.5 岩土边坡稳定分析的应力状态方法

作者经过长期的努力, 依据岩土边坡稳定分析的根本点, 建立了岩土边坡稳定和滑坡分析的剪力流量、抗剪流量表述——简洁、完美、实用的数学力学模型^[8,9]。同时结合边坡实际的特征, 简化、证明了该数学力学模型与积分路径无关, 将剪力流量、抗剪流量的有旋场化为无旋场, 进而得到了均质岩土边坡稳定分析的安全系数、极限坡高坡角和孔隙水应力影响的安全系数等系列解析解, 该体系称为岩土边坡稳定分析的应力状态方法。

所建立的边坡稳定分析的应力状态方法, 其基本理论体系如下:

(1) 基于岩土体内任意一点的力学效应和剪切材料的力学响应, 提出了任意一点稳定到非稳定及岩土边坡整体稳定到非稳定发展的分

水岭界限及其力学与行为描述,把任意一点的安全稳定与非稳定发展、滑动破坏准则条件进行分离式研究。

(2) 提出岩土边坡的整体稳定取决于由任意封闭曲面上的坡体应力状态产生的剪力流量和岩土材料的相应抗剪强度流量的表述方程,建立了边坡稳定分析安全系数的数学力学模型。

(3) 提出岩土边坡稳定分析的力学效应——边坡应力状态及其表述形式,适应弹性力学理论,岩土材料的抗剪性能适合库仑强度定律;采用弹性半空间岩土体应力与边坡卸荷应力进行叠加来描述一般边坡的应力状态。

(4) 依据岩土体土性的历史性、记忆性、信息性特点和边坡特征,提出岩土边坡的应力状态参数,完整地描述了一般岩土边坡的应力状态变化过程。

(5) 基于均质岩土边坡应力状态表述和简化边坡稳定分析的数学力学模型及论证,给出了用于岩土边坡稳定分析的系列解析解。

(6) 所建立的数学力学模型得到了系列解析公式,包括6参数的安全系数公式、7参数的孔隙水应力的安全系数公式、5参数的极限坡高与极限坡角的安全系数公式,该系列公式充分反映出岩土边坡稳定的安全系数的动态过程。

(7) 边坡稳定分析的数学力学模型和系列解析解,不仅实际应用简便,不依赖计算程序设计,而且为岩土边坡的非稳定发展到滑坡出现的研究奠定了理论基础,并为数值分析提供了基础方法。

1.6 本章结论

本章对岩土边坡稳定和滑坡分析的研究及发展作了基本的回顾,对边坡稳定分析的条分方法的基础内容进行了基本分析,并指出了该类方法的不足之处及缺陷所在。

本章介绍了作者所建立的岩土边坡稳定分析数学力学模型的根本出发点以及建立模型的实用要求,为以下各章对建立的岩土边坡稳定