

崩滑地质灾害 稳定性评价方法研究

NEW ASSESSMENT METHODS
STABILITY ANALYSIS FOR LANDSLIDE AND ROCK FALL

王根龙 叶万军 伍法权 苏天明 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

崩滑地质灾害稳定性评价方法研究

王根龙 叶万军 伍法权 苏天明 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要是对崩滑地质灾害稳定性评价方法的研究,是以崩滑地质灾害稳定性评价问题为主线,把全书分为两篇,第一篇为边坡(滑坡)稳定性评价极限分析法;第二篇为崩滑地质灾害机理及评价方法。全面介绍了崩滑地质灾害稳定性评价的国内外研究现状,系统阐述了边坡(滑坡)稳定性评价极限分析法和崩滑地质灾害机理及评价方法。

本书适合研究有关崩滑地质灾害的工作人员和学者。

图书在版编目(CIP)数据

崩滑地质灾害稳定性评价方法研究 / 王根龙等著

· 一上海 : 上海交通大学出版社, 2013

ISBN 978-7-313-10044-3

I. ①崩… II. ①王… III. ①土崩滑塌—地质—自然灾害—边坡稳定性—评价法—研究 IV. ①P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 148070 号

崩滑地质灾害稳定性评价方法研究

王根龙 叶万军 伍法权 苏天明 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

上海方正数字出版技术有限公司印刷 全国新华书店经销
开本: 710mm×1000mm 1/16 印张: 16.5 字数: 293 千字

2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-10044-3/P 定价: 38.00 元

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-61769600

前 言

边坡包括天然斜坡和人工边坡,是自然界或工程活动场所具有露天侧向临空面的一类地质体。边坡的稳定性评价问题是工程地质学、岩石力学和土力学领域的经典命题之一。我国是一个多山的国家,山地面积约占整个国土面积的70%,尤其是中西部地区,如秦巴山区、三峡库区和黄土高原区。这些地区地质环境脆弱,随着人类工程活动规模的日益加大,各类斜坡地质灾害(滑坡和崩塌)亦频繁出现,很大程度上制约了中西部地区的发展。据统计,仅1996~2000年间,因各类斜坡地质灾害平均每年造成死亡1 156人,所造成的经济损失达到200亿元/年。

以滑坡、崩塌为代表的斜坡失稳地质灾害,已经有100多年的研究历史。早期对边坡稳定性的研究主要是从两方面进行的:一是借用土力学中极限平衡的概念,根据三个静力平衡条件计算边坡极限平衡状态下的总稳定性(Fellenius, Peterson, 1916; Karl, Terzaghi, 1926; Bishop, 1955);二是从边坡所处的地质条件及滑坡现象上对滑坡发生的环境及机制进行分析,但基本上都是定性单因素的。然而从20世纪60年代以来,更多的学者已经注意到,崩滑地质灾害的力学机制只有用近代岩石力学理论才能解释,从而使有关边坡稳定性研究进入了模式机制研究或内部作用过程研究的新阶段。20世纪80年末以来,工程地质学及边坡科学研究进入了蓬勃发展的新时期。一方面,计算理论和数值模拟技术已广泛应用于边坡稳定性研究;另一方面,学科之间的相互渗透使许多与现代科学有关的一系列理论方法,如系统论方法、信息论方法、模糊数学、灰色理论、数量化理论及现代概率统计等被引入边坡科学研究,从而大大促进了理论的更新和应用研究及决策水平的提高。

作者早在1999年长安大学硕士学习阶段起,就在门玉明教授的启蒙下开始钻研边坡稳定性问题,并逐渐深入到塑性力学的极限分析理论领域。之后进入中国科学院地质与地球物理研究所,在著名工程地质专家伍法权教授的指导下完成了博士论文《边坡工程的极限分析上限法》。2009年以来,作者在博士后流动站工作期间,又完成了博士后研究报告《崩塌地质灾害机理及评价方法研究》。回想过去艰难的岁月,真是“路漫漫其修远兮”,然而终成此书,可谓“梅花香自苦寒来”。全书以崩滑地质灾害稳定性评价问题为主线,共分两篇,全面介绍了崩滑地质灾害稳定性评价的国内外研究现状,系统阐述了边坡(滑坡)稳定性分析评价的极限分析上限法,以及崩塌地质灾害机理和评价方法。

第一篇为边坡(滑坡)稳定性评价极限分析上限法。在极限分析理论体系框架下,构建了岩土质堆积体折线型滑面边坡垂直条分法,推导了稳定计算的极限分析上限解。提出了顺层岩质边坡极限分析上限法,得出了考虑岩体内部的薄层软岩和层面产生剪切错动的稳定系数极限分析上限解。提出了

加锚岩质边坡稳定分析计算模型,得到了加锚岩质边坡的极限分析上限法稳定系数计算公式。

第二篇为崩塌地质灾害机理及评价方法。从受力机制角度将崩塌划分为三大类:第一大类是因合力矩不为零而导致的倾倒式崩塌;第二大类是因受力不平衡导致的拉裂式崩塌,共又可以分为四个亚类,分别是卸荷-拉裂式崩塌、塑流-拉裂式崩塌、滑移-压致拉裂式崩塌和悬臂-拉裂式崩塌;第三大类是因受力不平衡导致的剪切-滑移式崩塌。提出了计算塑流-拉裂式崩塌的软弱层不均匀变形稳定性分析法、悬臂-拉裂式崩塌的最大拉应力-抗拉强度比值分析法和剪切-滑移式崩塌极限分析上限法。提出了崩塌危险性分级系统(RFRS)和公路崩塌易发区评价理论和评价方法。

本书的出版获得了国家自然科学基金面上项目(编号:41172262)、第45批中国博士后科学基金项目(编号:20090450565)和陕西省青年科技新星项目(编号:2012KJXX-37)的资助。本书在撰写过程中承蒙长安大学陈志新教授、门玉明教授、彭建兵教授,中国科学院地质与地球物理研究所秦四清研究员、胡瑞林研究员、李晓研究员、刘大安研究员、祁生文副研究员、张路青副研究员、李丽慧副研究员、李守定副研究员、常中华博士后,《工程地质学报》副主编宋玉环老师,中国地质调查局西安地质调查中心张茂省研究员,西北大学雷祥义教授,中国地震局工程力学研究所刘红帅副研究员,防灾科技学院李巨文教授,山东建筑科技大学祝介旺教授,中国矿业大学(北京)崔芳鹏副教授,华北水利水电学院董金玉副教授等都为本书提供了指导和部分宝贵资料。在此,对他们给予的关怀、鼓励与帮助表示衷心的感谢!

本书由中国地质调查局西安地质调查中心王根龙博士、西安科技大学叶万军教授、中国科学院地质与地球物理研究所伍法权研究员和公路科学研究院苏天明副研究员共同撰写而成,王根龙博士负责大部分章节的撰写及全书的编纂与定稿工作。由于作者水平有限,书中存在纰漏甚至错误,敬请读者批评和指正。

作者

2013年6月于西安

目 录

第一篇 边坡（滑坡）稳定性评价极限分析上限法

1 绪 论.....	003
1.1 问题的提出	003
1.2 国内外研究现状	011
1.3 研究内容及技术路线	013
2 极限分析上限法原理.....	016
2.1 极限分析上限定理的基本假定	016
2.2 机动许可速度场	018
2.3 极限分析的虚功率方程	019
2.4 极限分析塑性力学上限定理	022
3 圆弧滑面极限分析上限法.....	025
3.1 圆弧滑面垂直条分法平移破坏机制	025
3.2 圆弧滑面垂直条分法塑性极限分析稳定系数	028
3.3 有孔隙压力影响情况下的稳定系数	031
3.4 圆弧滑面径向分条模式上限解	033
4 对数螺旋线滑面极限分析上限法.....	040
4.1 对数螺旋线滑裂面的讨论	040
4.2 简单坡面的对数螺旋线破坏机制	040
4.3 滑动面不通过坡脚的情况	045
4.4 典型算例验证	047
5 刚体单元上限法.....	049
5.1 非均质土坡旋转破坏机构	049
5.2 层状土质边坡外力功率计算	050
5.3 对数螺旋线组合滑面内能耗散计算	052
5.4 刚体单元法稳定系数上限解	053

6	边坡加固方法研究.....	057
6.1	土钉支护结构的极限分析上限法	057
6.2	抗滑桩加固土坡的极限分析上限法	059
6.3	加筋土坡的极限分析上限法	062
6.4	挡土墙主动土压力的极限分析上限法	064
7	折线型滑面极限分析上限法.....	067
7.1	折线型滑面边坡极限分析法	067
7.2	垂直分条折线型滑面破坏机制	067
7.3	工程算例	070
8	顺层滑动极限分析上限法.....	073
8.1	简单平面岩质边坡极限分析上限法	073
8.2	顺层岩质边坡极限分析上限法	081
8.3	顺层岩质边坡稳定性极限分析算例	087
8.4	岩质边坡后缘张裂缝发生位置的预测方法	089
9	加锚岩质边坡稳定性评价的极限分析上限法.....	093
9.1	加锚岩质边坡极限分析上限法可行性分析	093
9.2	加锚岩质边坡极限分析法计算模型	095
9.3	外力功率与内能耗散	098
9.4	加锚岩质边坡虚功率方程	100
9.5	算例分析	101
	参考文献.....	105

第二篇 崩塌地质灾害机理及评价方法研究

1	绪论.....	117
1.1	研究的意义	117
1.2	崩塌的定义	120
1.3	研究现状	123
1.4	研究内容及技术路线	125

2	崩塌分类方法研究.....	128
2.1	铁道部分类方法	128
2.2	岩质崩塌地质力学分类方法	130
2.3	其他分类方法	135
2.4	黄土崩塌分类方法	139
3	岩质崩塌灾害机理及模式.....	151
3.1	崩塌灾害的影响因素	151
3.2	离散单元法原理	153
3.3	崩塌形成破坏过程数值分析	157
4	岩质崩塌稳定评价计算方法.....	174
4.1	倾倒式崩塌稳定性计算	174
4.2	拉裂式崩塌稳定性计算	177
4.3	剪切-滑移式崩塌稳定性计算	183
5	崩塌灾害调查、危险性分级与分区评价.....	200
5.1	崩塌灾害调查	200
5.2	崩塌危险性分级系统 (RFRS)	205
5.3	崩塌灾害易发区划分	224
	参考文献.....	236
	索引.....	250

第一篇

边坡（滑坡）稳定性评价极限分析上限法



1 绪 论

1.1 问题的提出

边坡,包括天然斜坡和人工边坡,是自然界或工程活动场所具有露天侧向临空面的一类地质体。边坡的稳定和变形问题是工程地质学、岩石力学和土力学领域的经典问题之一。随着社会经济的发展和科学技术的进步,人类的工程活动日益频繁,基础建设诸如建筑工程、交通工程、水利水电工程、港航工程和矿山工程等得到了前所未有的发展,其规模也日益扩大。据统计,人类活动的地下开挖深度已经超过 1 000m,最高人工边坡已达 600m,而水电工程中遇到的天然边坡高度已达 500~1 000m,随着工程规模的扩大,边坡的高度也越来越高,其中涉及的工程地质问题极为复杂。如黄河小浪底水电工程进水口边坡高 120m,澜沧江小湾水电站泄水建筑物边坡高达 239m,清江隔河岩水利枢纽出水口边坡最高达 150m,抚顺西露天矿高边坡开挖深度已超过 300m,溪洛渡水电站拱肩槽边坡高达 250m。

边坡工程稳定状况事关工程成败和安全,通常将边坡的失稳称之为滑坡,它可以造成极为严重的后果。边坡的变形、失稳破坏极为普遍,边坡失稳已成为一种常见的危害人民生命财产安全及工程正常运营的地质灾害。

从材料可以将边坡划分为土质边坡和岩质边坡。对于岩质边坡来说,边坡并不是整体一块,而是由各种各样的结构面和结构体两种单元组成不同的边坡岩体结构类型。常见的岩体结构类型可分为:①块状结构;②镶嵌结构;③碎裂结构;④层状结构;⑤层状碎裂结构;⑥散体结构。它们的主要特征如表 1-1 所示。

不同岩体结构的边坡,其变形破坏模式也不同。块状结构岩体,整体强度较高,自然条件下一般不会发生失稳破坏。对于镶嵌结构岩体,强降雨条件下可能会造成局部的崩塌和落石,但不会造成大规模的失稳。碎裂结构岩体造成了岩体松动,造成大量的崩塌、落石以及小规模的滑动。层状结构的岩体受层面的控制,在一定条件下可能沿层面产生滑动。而对于散体结构的边坡,在强降雨、地震、人工开挖作用下常常产生大量的崩塌和滑塌,而且有可能导致大规模滑坡和流滑。土质边坡可以看成散体结构。

表 1-1 岩体结构类型及其特性（谷德振，1979）

岩体结构类型	岩体地质类型	主要结构体形式	结构面发育情况	工程地质评价
块状结构	厚层沉积岩 火成侵入岩 火山岩 变质岩	块状柱状	节理为主	岩体在整体上强度较高，变形特性上接近于均匀弹性各向同性体。作为坝基及地下工程洞体，具有良好的工程地质条件；坝肩及边坡条件也属良好，但要注意不利于岩体稳定的平缓节理
镶嵌结构	火成侵入岩 非沉积变质岩	菱形锥形	节理比较发育，有小断层错动带	岩体在整体上强度仍高，但不连续性较为显著。在坝基处局部处理后仍不失为良好基础，在边坡较陡时以崩塌形式出现，不易构成巨大滑坡体，在地下工程若跨度不大，塌方事故很少
碎裂结构	构造碎裂岩 较强烈岩体	碎块状	节理、断层及断层破碎带交叉，劈理发育	岩体完整性破坏较大，强度受断层及软弱结构面控制，并易受地下水作用影响，岩体稳定性较差。在坝基要求对规模较大的断层进行处理，一般可做固结灌浆，在边坡有较大的塌方，在地下矿坑开采中易产生塌方、冒顶，要求支护紧跟，对永久性地下工程要求衬砌
层状结构	薄层沉积岩 沉积变质岩	板状楔状	层理、片理、节理比较发育	岩体呈层状，接近均一的各项异性介质。作为坝基、坝肩、边坡及地下洞体的岩体稳定与岩层产状关系密切，一般陡立的较为稳定，而平缓的较差，倾向不同也有很大差异，要结合工程具体考虑。但这类岩体在坝肩、坝基、边坡破坏事故出现很多
层状碎裂结构	较强烈褶皱及破碎的层状岩体	碎块状片状	层理、片理、节理、断层、层间错动带发育	岩体稳定性破坏较大，整体强度降低，软弱结构面发育，易受地下水的不良作用，稳定性很差。不宜选作高混凝土坝、坝基、坝肩，或要求处理，边坡设计角较低，地下工程施工常遇塌方，永久性工程要求加厚衬砌
散体结构	断层破碎带 风化破碎带	鳞片状碎屑状颗粒状	断层破碎带、风化带及次生结构面	岩体强度遭到极大破坏，接近松散介质，稳定性最差，在坝基及人工边坡上要做清基处理，在地下工程进出口处也应进行适当处理

根据边坡的工程地质模型,可以确定边坡变形破坏的形式。李铁汉(1980)根据滑动面的形态、数目、组合特征以及边坡岩体破坏的力学性质,将边坡变形破坏划分为五类,每类中又分若干亚类:①曲面滑动,又分为圆弧形滑动和非圆弧形滑动;②平面滑动,又分为无拉裂面平面滑动和有拉裂面滑动;③双平面滑动,又分为异向双平面滑动和同向双平面滑动;④多平面滑动,又分为一般多平面滑动和阶梯状滑动;⑤倾覆破坏。这五种形式实际上就是曲面滑动、平面滑动以及倾覆破坏三种(见图1-1)。

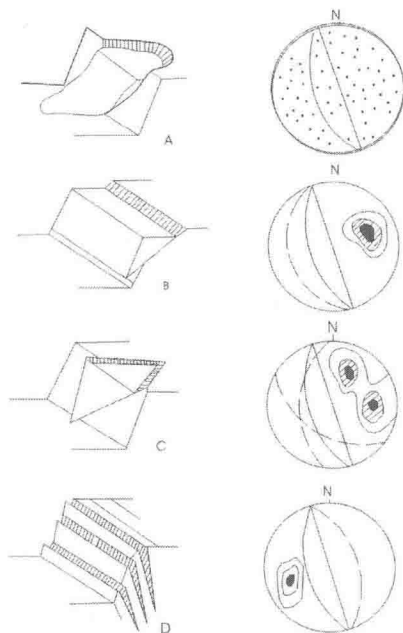


图 1-1 边坡变形破坏形式判断

A 圆弧破坏 B 平面破坏 C 楔形破坏 D 倾倒破坏

薛守义(1989)将边坡的变形破坏形式分为滑动型、崩塌型、塑性变形、层体弯折四大类,各大类之下又分若干亚类(见表1-2)。将极限分析上限原理应用于边坡分析评价时,因为要计算滑面剪切引起的内能耗散,因此文中方法只适用于滑动型边坡的变形破坏模式,如圆弧滑动、平面滑动(包括层间错动)、楔形体滑动、折线滑面滑动等。

表 1-2 边坡的变形破坏类型 (薛守义, 1989)

类 型	基本特征	岩体结构条件	亚 类
滑动型	变形破坏主要沿某滑面进行。滑动后滑体受扰动较小, 可视为刚体	滑面往往是岩体中规模较大的结构面, 特别是软弱结构面	(1) 曲面滑动包括圆弧和非圆弧滑面 (2) 平面滑动 (包括层间错动) (3) 楔形体滑动
崩塌型	变形破坏不是沿某面滑动, 变形体受到明显的扰动, 甚至松散至分离状	可能发生于任何结构类型的边坡, 没有明显的整体滑动控制性结构面, 但开裂变形明显受结构面控制	(1) 落石型 (2) 松动型 (3) 崩落型
塑性变形	只产生较大的塑性变形, 无明显滑动面。变形过度时, 可产生整体滑动	多发生于散体边坡或者被结构面严重切割而又无明显控制性滑面的碎裂结构边坡中	(1) 塑性流动 (2) 液化流滑
层体弯折	岩层弯曲倾倒或者折裂	发生于薄层状结构、似层状结构边坡中	(1) 倾倒弯折 (2) 溃屈弯折

1985年6月12日秭归县发生新滩特大型滑坡, 总方量约3 000万立方米, 毁坏房屋1569间, 滑入长江的土石方约为2000万立方米, 激起的波浪高达33~39米, 涌浪造成77艘船只翻沉, 一度使长江航运受阻, 损失惨重。1989年1月7日漫湾电站左坝肩滑坡, 增加工程处理费1.2亿元, 工期推迟1年多, 间接经济损失逾10亿元。1997年南昆八渡滑坡(640×10^4 立方米)在雨季施工过程中复活蠕变加剧, 对八渡车站造成极大威胁, 整治工程耗资约1亿元。2003年7月13日发生的千将坪滑坡是三峡水库蓄水以来库区内发生的重大滑坡灾害之一, 总方量约2400万立方米, 这次滑坡共造成24人死亡, 1100多人无家可归, 4家工厂被毁, 334省道宜昌—巴东公路长达2.4km的路段被毁, 交通中断。2007年11月20日湖北省宜万318国道路段发生岩崩滑坡, 导致一辆客车被掩埋, 造成31人死亡, 其中包括4名儿童。

边坡(滑坡)稳定性分析是岩土工程和地质工程的一类十分重要的研究课题, 其研究由来已久。迄今为止, 其研究已很深入, 分析方法也很多, 但主要的分析方法大致分为三类: 刚体极限平衡法、数值分析法和极限分析法。此外, 概率分析方法、模糊综合评价法、突变理论、灰色系统评价法、遗传进化算法、人工神经网络评价法、图解法和滑移线法等也在边坡工程的研究中得到了一定的应用。

1.1.1 刚体极限平衡法

刚体极限平衡法（见表 1-3）是目前边坡稳定性分析最常用的一种方法，其中以条分法最为重要。这类方法一般是先假定破裂滑动面为圆弧、圆弧 + 直线或其他不规则面，并假定该滑动面土体满足库仑破坏准则，然后从边坡取出一个隔离体，根据作用在该隔离体上的已知力或假定力，计算出维持平衡所需要的土的抗剪强度，将该强度与实际状态的抗剪强度进行比较，求出安全系数作为衡量边坡稳定性的基本指标。

表 1-3 刚体极限平衡法的主要特点（张倬元，等，略修改）

分析方法	提出时间	应用条件和要点
瑞典条分法 (Fellenius)	1927	圆弧滑面，垂直分条，定转动中心，条块间作用合力平行滑面
毕肖普法 (Bishop)	1955	圆弧滑面或其他任意形状滑面，垂直分条，拟合滑弧与转心，条块间作用力水平，条间切向力 X 为零
简布法 (Janbu)	1956	非圆弧滑面，垂直分条，精确计算按条块滑动平衡确定条间力，按推力线（约滑面以上 1/3 高处）定法向力 E 作用点；简化条间切向力 X 为零，再对稳定系数作修正
斯宾塞法 (Spencer)	1967	圆弧滑面，或拟合中心圆弧，垂直分条。切向力和法向力比值 X/E 为一给定常值
摩根斯坦—普赖斯法 (Morgenstern and Price)	1965	圆弧或非圆弧面，垂直分条，切向力和法向力比值 X/E 存在与水平方向坐标的函数关系 ($X/E=\lambda(x)$)
萨尔玛法 (Sarma)	1979	复杂滑面，可以任意分条，认为除平面和圆弧滑面外，滑体必须先破裂成相互错动的块体才能滑动，以保证块体处于极限平衡状态为原则确定稳定系数
传递系数法	-	圆弧或非圆弧面，垂直分条，条块间合力方向与上一条块滑面平行。($X_i/E_i=\tan \alpha_{i-1}$)
楔体分析法	1974	楔型滑面，各滑面总抗滑力和楔体总体下滑力确定稳定系数

刚体极限平衡法的各种方法最大的区别在于对条块间作用力的假设与所需满足的平衡条件不同。如瑞典条分法 (Fellenius, 1927) 与毕肖普法 (Bishop, 1955) 要求满足整体力矩平衡条件，但瑞典圆弧法完全没有考虑条间的相互作用力，毕肖普法仅考虑条间的水平作用力，而没有考虑土条间的剪力。简布法 (Janbu, 1956)、斯宾塞法 (Spencer, 1967)、摩根斯坦—普赖斯法 (Morgenstern and Price, 1965) 及萨尔玛法 (Sarma, 1979) 要求满足力矩和力的平衡条件，其中简布法假定条间力的作用点位置，斯宾塞法假定相邻土条之间的法向条间

力与切向条间力之间有一固定的常数关系，摩根斯坦-普赖斯法假定相邻土条法向条间力和切向条间力之间存在一个对水平方向坐标的函数关系，萨尔玛法假定沿相邻土条的垂直分界面，所有平行于土条底面的斜面均处于极限平衡状态，从而可推导出切向条间力的分布。我国铁路部门和地基基础规范中使用的不平衡推力法没有考虑力矩平衡条件，但也属于刚体极限平衡方法。各种条分法的区别详见表 1-4。

表 1-4 条分法各种方法比较（钱家欢，等）

计算方法	所满足的平衡条件				滑裂面形式	计算手段	
	整体力矩	土条力矩	垂直力	水平力		手算	计算机
瑞典圆弧滑动法	√	×	×	×	圆弧	√	√
简化毕肖普法	√	×	√	×	圆弧	√	√
简布法	√	√	√	√	任意	√	√ *
斯宾塞法	√	√	√	√	任意	×	√ *
摩根斯坦-普赖斯法	√	√	√	√	任意	×	√ *
萨尔玛法	√	√	√	√	任意	√	√

* 表示在某些情况下收敛可能有困难。

在大多数情况下，边坡稳定性问题是超静定的。极限平衡分析法处理这个问题的对策是引入一系列近似假定（如滑动面的假设、条间力的假设等），使问题变得静定可解。这种处理导致其计算结果与实际情况有较大出入。特别是在分析复杂边坡的稳定性时，由于不能给出岩、土体内部的应力-应变行为，未能考虑时间因素的影响，所以难以了解到边坡的失稳机理（如岩土体的蠕变、内部变形和脆性破坏，较弱土层的液化等），增加了边坡失稳破坏的概率和对风险及后果做出评估的难度。

1.1.2 数值分析法

数值分析方法主要包括有限元（ANSYS，ADINA）、离散元（3DED，UDEC）和边界元（BEM）。该方法以边坡在失稳之前伴随的较大变形为依据，将稳定和变形紧密地联系起来。并考虑到岩土材料的非均质性、各向异性以及非线性本构关系，通过计算单元的应力及应变，根据不同的强度指标确定破坏区的位置及其扩展情况，并设法将局部破坏和整体破坏联系起来，求得合适的临界滑裂面位置。应该指出，数值分析方法在模拟边坡变形破坏机理等方面有着独特的优点，并且它不需要假定滑动面。但由于岩土边坡是由各种不同成因类型、历经不同地质作用的地质体所组成的复杂介质，又具有类型不同、规模不一、方位各异的地质不连续面，呈现出复杂的力学属性和边界条件，如几何学上的非线性、应力-应变关系的非线性、介质的各向异性及不均一性、介质

的不连续性和初始应力等，其失稳破坏也往往表现为多个力（如孔隙压力、地震荷载等）耦合作用的结果。因此，数值分析方法在应用上仍需要长时间的探索和完善。

除了上述三种数值分析方法外，快速拉格朗日差分法（FLAC^{3D}）、块体理论（BT）、不连续变形分析法（DDA）、无界元法（IDEM）和流形元法也是较为重要的边坡数值分析方法。各种数值分析方法的主要特点详见表 1-5。

表 1-5 部分数值分析方法的主要特点

分析方法	运行机制	适用特点	存在缺陷
有限元法（FEM）	离散岩土介质为多个单元，荷载移植至节点，插值函数考虑连续条件，采用矩阵位移法或力法求解岩土介质应力场和位移场	可以用来求解弹性、弹塑性、黏弹塑性、黏塑性等问题；部分的考虑了非均质、不连续性，可以给出岩土体应力、应变的大小与分布	对大变形、不连续位移、无限域、应力集中等问题的求解不理想
边界元法（BEM）	将介质边界离散为边界单元，把边界微分方程转化为线性代数方程组，求解边界应力和位移解，再由解析法计算域内任一点的解	只对研究区的边界进行离散，数据输入量较少，对处理无界域、半无界域等问题较为理想	要求事先知道控制微分方程的基本解，在处理非线性、不均匀性、模拟分步开挖等方面不如有限元法
离散元法（DEM）	将区域离散为单元，但单元节点可以分离，单元间的作用力可由力与位移的关系求出，个别单元的运动由牛顿运动定理确定	动态性，考虑了岩体的非均质、不连续和大变形等特点，允许块体间发生平动、转动甚至相互脱离，可形象反映应力场、速度、位移等力学参量的全程变化	只对块状、层状破裂或一般碎裂结构岩体适合
快速格朗日差分法（FLAC ^{3D} ）	有限差分原理	考虑岩土体不连续性、大变形特征，求解速度较快	计算边界、单元网格的划分具有很大的随意性
块体理论（BT）	几何学原理与解析方法	几何学特征，利用拓扑学、群论原理，适用于岩体稳定分析	只考虑抗剪强度，不计节理变形、力矩作用
不连续变形分析法（DDA）	通过不连续面间的相互约束建立整个系统的力学平衡条件，引入了非连续接触和惯性力，采用运动学原理解决非连续的动力与静力问题	考虑了变形的不连续性，引入了时间因素，可以计算静力、动力问题，可以计算岩体破坏前小变形及破坏后大位移问题	网格的划分比较复杂