



高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材

总主编 何若全

边坡工程

BIANPO
GONGCHENG

主 编 李建林

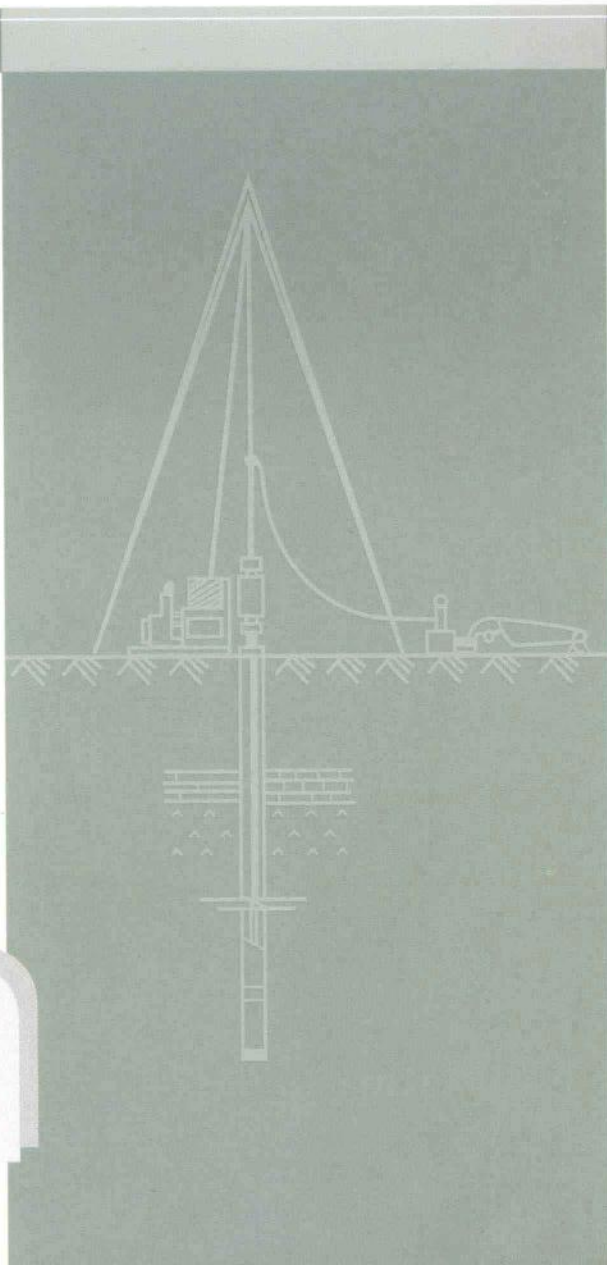
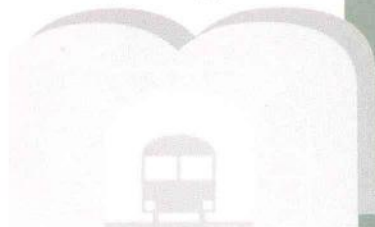
副主编 王乐华

主 审 刘东燕



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>





高等学校土木工程本科指导性专业规范

总主编 何若全

边坡工程

BIANPO
GONGCHENG

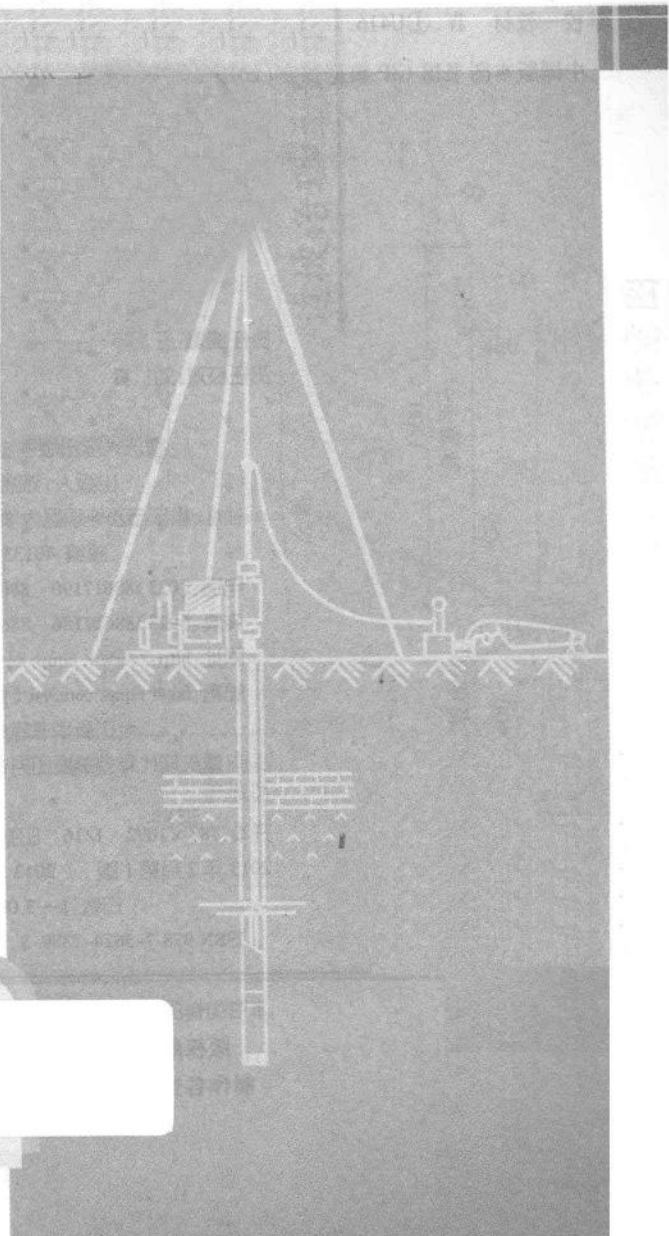
主 编 李建林

副主编 王乐华

主 审 刘东燕

重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>



内 容 提 要

本书是《高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材》之一,主要介绍边(滑)坡的概念、边坡的类型及其破坏特征、边坡工程地质勘察、影响边坡稳定性因素、边坡稳定性评价方法、边坡稳定分析数值方法、边坡工程设计、边坡绿化工程、边坡施工、边坡监测等内容。

本书以“高等学校土木工程本科指导性专业规范”为基本依据编写,可供高等工科院校土木工程及相关专业作教学用书,也可供从事土木工程(水利工程)设计、施工、管理、监测等技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

边坡工程/李建林主编. —重庆:重庆大学出版社,2013.7

高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材

ISBN 978-7-5624-7389-3

I. ①边… II. ①李… III. ①边坡—道路工程—高等学校—教材 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 102205 号

高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材

边坡工程

主 编 李建林

副主编 王乐华

主 审 刘东燕

责任编辑:王 婷 王 伟 版式设计:莫 西

责任校对:刘 真 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆现代彩色书报印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:17 字数:424 千

2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

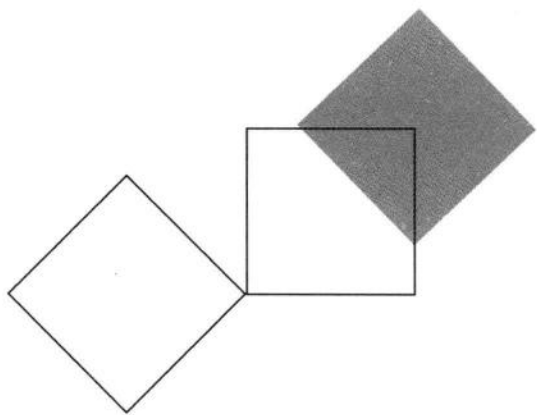
印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-7389-3 定价:29.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究



编委会名单

总 主 编：何若全

副总主编：杜彦良 邹超英 桂国庆 张永兴

编 委（按姓氏笔画为序）：

卜建清	王广俊	王连俊	王社良
王建廷	王雪松	王慧东	仇文革
文国治	龙天渝	代国忠	华建民
向中富	刘 凡	刘 建	刘东燕
刘尧军	刘俊卿	刘新荣	刘曙光
许金良	孙 俊	苏小卒	李宇峙
李建林	汪仁和	宋宗宇	张 川
张忠苗	范存新	易思蓉	罗 强
周志祥	郑廷银	孟丽军	柳炳康
段树金	施惠生	姜玉松	姚 刚
袁建新	高 亮	黄林青	崔艳梅
梁 波	梁兴文	董 军	覃 辉
樊 江	魏庆朝		

总 序

进入 21 世纪的第二个十年,土木工程专业教育的背景发生了很大的变化。“国家中长期教育改革和发展规划纲要”正式启动,中国工程院和国家教育部倡导的“卓越工程师教育培养计划”开始实施,这些都为高等工程教育的改革指明了方向。截至 2010 年底,我国已有 300 多所大学开设土木工程专业,在校生达 30 多万人,这无疑是世界上该专业在校大学生最多的国家。如何培养面向产业、面向世界、面向未来的合格工程师,是土木工程界一直在思考的问题。

由住房和城乡建设部土建学科教学指导委员会下达的重点课题“高等学校土木工程本科指导性专业规范”的研制,是落实国家工程教育改革战略的一次尝试。“专业规范”为土木工程本科教育提供了一个重要的指导性文件。

由“高等学校土木工程本科指导性专业规范”研制项目负责人何若全教授担任总主编,重庆大学出版社出版的《高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材》力求体现“专业规范”的原则和主要精神,按照土木工程专业本科期间有关知识、能力、素质的要求设计了各教材的内容,同时对大学生增强工程意识、提高实践能力和培养创新精神做了许多有意义的尝试。这套教材的主要特色体现在以下方面:

(1) 系列教材的内容覆盖了“专业规范”要求的所有核心知识点,并且教材之间尽量避免知识的重复;

(2) 系列教材更加贴近工程实际,满足培养应用型人才对知识和动手能力的要求,符合工程教育改革的方向;

(3) 教材主编们大多具有较为丰富的工程实践能力,他们力图通过教材这个重要手段实现“基于问题、基于项目、基于案例”的研究型学习方式。

据悉,本系列教材编委会的部分成员参加了“专业规范”的研究工作,而大部分成员曾为“专业规范”的研制提供了丰富的背景资料。我相信,这套教材的出版将为“专业规范”的推广实施,为土木工程教育事业的健康发展起到积极的作用!

中国工程院院士 哈尔滨工业大学教授

沈世钊

前 言

在建筑、交通、铁道、矿山、水利、电力等土木工程建设过程中,常常会遇到或者形成大量的边坡工程。边坡工程已经成为上述各类土木工程建设中建筑物的重要组成部分。例如,建筑在山地上的房屋,房屋及其基础与边坡连为一体,共同受力、共同作用;又如,建筑在边坡上的水工建筑物——拱坝,拱坝与边坡连为一体、共同受力、相互作用、互为支撑。类似这些工程,其边坡工程成为了工程建筑物不可分割的重要组成部分,协同工作。工程中,许多边坡工程结构形状复杂、尺度又大,加上岩(土)体本身结构特征、历史作用过程、力学特性和赋存环境的复杂性,若在设计 and 施工过程中处理不当,这些边坡工程往往会事故频发,不但增加了工程建设的周期和投资成本,而且直接影响到工程建设的质量和人民生命财产的安全,有些边坡工程问题已成为制约工程建设和影响公共安全的关键性问题。因此,土木工程建设 and 运营过程中,就必须保持边坡工程的稳定性与安全性。边坡工程的设计、施工和维护,是土木工程专业学习不可或缺的重要内容。

边坡工程研究起源于矿山工程建设,由于人们开采矿物资源而开挖山体,从而形成了大量的人工边坡工程。为了维护其稳定性,保证开采施工的安全,各国学者针对边坡工程进行了较为系统的研究。其后,在建筑、交通、铁道、水利、水电等土木工程建设过程中,边坡工程不断涌现,引起了更加广泛的关注和深入系统的研究。尤其是国家以能源、交通为主的西部大开发战略的成功实施,在工程建设过程中遇到了大量的复杂的边坡工程问题。为了维持这些边坡工程的安全稳定性,边坡工程的研究和应用得到了前所未有的关注和重视。到目前为止,可以说边坡工程已经成为了一门独立的学科。《边坡工程》一书较早见于 E. Heok 和 J. W. Bray 编写的《岩石边坡工程》(Rock Slop Engineering, Revised Second Edition, 1981),其主要是针对矿山工程的。之后,尤其是 20 世纪 90 年代以来,国家经济建设过程中,各类土木工程建设均遇到了一系列复杂的边坡工程,不少专家学者对此开展了广泛地研究,产生了一批重要成果,陆续出版了一些有关边坡工程方面的著作。但是,这些著作主要是介绍作者各自的研究成果,研究各有侧重,内容不够系统,而作为国家土木工程专业本科生教材使用的边坡工程一书,到目前为止,还不多见。因此,基于这些考虑,编者试图编写《边坡工程》一书,以利于广大土木工程专业(含水利水电工程等专业)本科生学习之用。

本教材根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材》编委会要求编写,按照“面向产业、面向世界、面向未来”的宗旨,实施“基于问题、基于项目、基于案例”的学习,最大限度地贴近工程,回归工程教育的本质要求。本书主要针对边坡稳定分析、治理设计和施工中的关键问题,围绕边坡工程案例、工程背景、工程问题和典型项目进行编写;同时,本着“核心内

容最低标准”和“内容最小化”的原则精神来组织编写。

本教材的定位是:针对当前我国高等教育中工程教育的师资和学生的现状,面向 80% 土木工程(含水利水电工程)本科高校,满足应用型人才培养的需求,提供一套与高等学校土木工程本科指导性专业规范配套、符合教育教学改革发展方向的教材,努力使本教材成为国内最受欢迎的土木工程(含水利水电工程)专业教材之一。

本教材强调“导向、背景和主线”,即以建筑、交通、铁道、矿山、水利、电力等土木工程行业企业需求为导向,以典型边坡工程实际为背景,以边坡稳定分析、治理设计和施工中的关键工程技术为主线;注重“一个素养、三个能力”的培养,即着力提升学生的土木工程专业素养,着力培养学生解决边坡工程中边坡稳定分析、治理设计和施工中关键问题的工程实践能力、工程设计能力和工程创新能力;体现推动三个“基于”的学习,即基于边坡工程设计、施工中关键问题的学习、基于具体边坡工程项目的学习、基于典型边坡工程案例的学习。上述的“强调”“注重”和“体现”,是本教材的特色所在。

本教材的宗旨是:力图使土木工程专业(含水利水电工程专业)学生在掌握基本理论的基础上,能够善于分析边坡工程设计和施工过程中所发生的物理力学现象,并透过这些物理力学现象去把握边坡工程设计与施工过程的实质,同时掌握影响边坡工程设计与施工过程中的主要因素及其可能的变化,熟练地运用数学、力学与工程知识,解决边坡工程设计和施工过程中的问题。

本教材由三峡大学组织编写。全书由三峡大学李建林教授担任主编、王乐华副教授担任副主编,重庆大学刘东燕教授担任主审。参与编写工作的还有王孔伟、王志俭、邓华锋、刘杰、夏振尧、黄宜胜。

各章编写分工如下:第 1 章由李建林与王乐华编写;第 2 章由邓华锋编写;第 3 章由王孔伟编写;第 4 章由黄宜胜编写;第 5 章由刘杰编写;第 6 章由王志俭编写;第 7 章由夏振尧编写;第 8 章由王乐华与李建林编写;第 9 章由王志俭与王乐华编写。马莉、李建荣、骆世威、原先凡、周时、罗骞、叶建华等研究生也参加了资料整理和清绘插图等工作。

本教材在编写过程中,参阅了大量的参考文献资料,在此向这些资料的提供者表示感谢。

限于作者水平,难免有欠妥之处,敬请读者指正。

编者
2013 年 2 月

目 录

1	边坡与边坡工程	1
1.1	边坡与滑坡	1
1.2	边坡工程	4
1.3	边坡稳定性研究的发展	6
1.4	边(滑)坡治理技术的发展	8
	本章小结	9
	习题	9
	参考文献	10
2	边坡的类型及其破坏特征	12
2.1	边坡分类	12
2.2	边坡地质结构	15
2.3	边坡破坏特征	22
	本章小结	38
	习题	39
	参考文献	39
3	边坡工程地质勘察	41
3.1	边坡工程勘察的基本技术要求	41
3.2	边坡工程勘察方法	45
3.3	勘察资料的分析与整理	64
	本章小结	68
	习题	68
	参考文献	68
4	边坡稳定性评价	69
4.1	影响边坡稳定性的因素	70
4.2	边坡稳定性的判别标准	72

4.3	工程地质类比法	74
4.4	赤平投影法	76
4.5	刚体极限平衡法	78
4.6	特殊滑动模式岩坡稳定性分析方法	84
	本章小结	90
	习题	91
	参考文献	91
5	边坡稳定分析数值方法	92
5.1	边坡稳定分析有限元法(FEM法)	93
5.2	有限差分法(FDM法)	103
5.3	不连续变形分析法(DDA法)	106
5.4	反分析法	109
5.5	数值分析的其他方法	116
	本章小结	119
	习题	120
	参考文献	120
6	边坡工程设计	122
6.1	边坡工程设计的基本资料与基本原则	122
6.2	坡率法与削坡减载设计	125
6.3	边坡支护结构的侧向岩土压力	129
6.4	重力式挡土墙设计	138
6.5	悬臂式及单支点支护结构设计	149
6.6	锚杆(索)设计	159
6.7	排水设计	173
	本章小结	180
	习题	181
	参考文献	182
7	边坡绿化	184
7.1	边坡绿化的必要性与特点	184
7.2	边坡绿化技术	186
7.3	边坡绿化工程设计	193
	本章小结	198
	习题	199
	参考文献	199

8	边坡工程施工与监测	200
8.1	边坡工程施工	200
8.2	滑坡工程施工	208
8.3	信息施工法	213
8.4	边坡工程爆破施工	216
8.5	边坡工程的施工组织设计	219
8.6	边(滑)坡工程监测	224
	本章小结	235
	习题	236
	参考文献	236
9	工程实例——云沱段连接线边坡治理设计	238
9.1	工程概况	238
9.2	设计基本资料	238
9.3	设计方案	243
9.4	边坡稳定性分析	243
9.5	工程治理设计	245
	本章小结	254



1 边坡与边坡工程

本章导读:

- **基本要求** 掌握边坡、滑坡、边坡工程的概念;掌握建筑边坡、水利水电工程边坡、自然边坡、临时边坡、稳定边坡、失稳、失稳边坡等相关概念,掌握边坡与滑坡的区别,掌握边坡的构成要素;了解滑坡稳定性研究进展、边坡治理措施。
- **难点** 边坡的概念、边坡与滑坡的区别,边坡工程。
- **重点** 边坡构成要素,边坡与滑坡的区别,边坡工程。

1.1 边坡与滑坡

1.1.1 边坡概念

边坡是自然或人工形成的斜坡,是人类工程活动中最基本的地质环境之一,也是工程建设中最常见的工程形式。

露天矿开挖形成的斜坡构成了采矿区的边界,因此称为边坡;在铁路、公路建筑施工中,所形成的路基斜坡称为路基边坡;开挖路堑所形成的斜坡称为路堑边坡;在水利建设中开挖形成的斜坡也称为边坡。图 1.1 ~ 图 1.9 为各类工程边坡现场图。

典型的边坡(斜坡)如图 1.10 所示。边坡与坡顶相交的部位称为坡肩,与坡底面相交的部位称为坡趾或坡脚,坡面与水平面的夹角称为坡面角或坡倾角,坡肩与坡脚间的高差为坡高。

建筑边坡:在建(构)筑物场地或其周边,由于建(构)筑物和市政工程开挖或填筑施工所形成的人工边坡和对建(构)筑物安全或稳定有影响的自然边坡。



图 1.1 某公路边坡



图 1.2 某矿山边坡



图 1.3 京沪高铁汤山路基边坡



图 1.4 京沪高铁西渴马 2 号隧道边坡



图 1.5 小湾水电站左岸高边坡



图 1.6 某深基坑支护

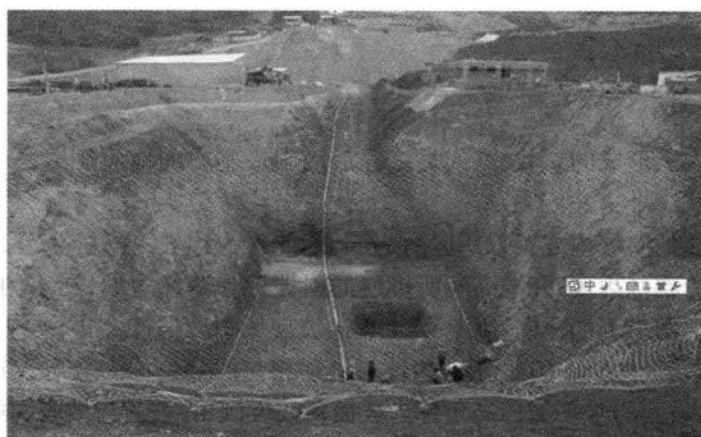


图 1.7 某深基坑开挖图



图 1.8 山地城市削坡建房



图 1.9 三峡库区巴东县新城区某边坡治理前后对比图

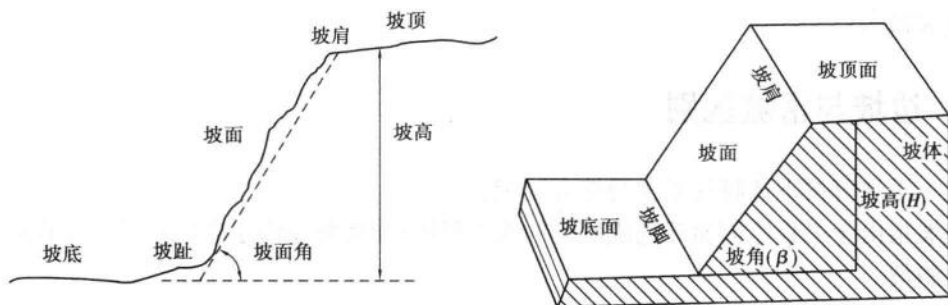


图 1.10 边坡构成要素

• 水利水电工程边坡: 修建水利水电工程形成的、因修建水利水电工程有可能影响其稳定的以及对水利水电工程安全有影响的边坡统称为水利水电工程边坡。

• 基坑侧壁: 构成建筑基坑围体的某一侧面。

• 自然边坡: 天然存在的由自然营力形成的边坡, 包括滑坡倾倒变形体边坡。

• 临时边坡: 仅在短时间内或工程施工期处于临空状态, 修建建筑物后边坡不再处于临空状态的边坡。

• 永久边坡: 长期处于临空状态的边坡。

• 稳定边坡: 未出现明显的变形裂缝和其他失稳迹象, 处于稳定状态的边坡。

• 失稳边坡: 边坡发生滑动、溃屈、倾倒、崩塌、坍塌、拉裂和流动的现象称为失稳。处于正在滑动、溃屈、倾倒、崩塌、坍塌、拉裂或流动的边坡称为失稳边坡。

在铁路、公路与水利建设中, 路基边坡与路堑边坡的稳定性严重影响到铁路、公路与水利设施的安全运营与建设成本。在路堤施工中, 在路堤高度一定的条件下, 坡角越大, 路基所占面积

越小,反之越大。在平原地区,由于耕地紧张,为了保护耕地,路基边坡的坡角愈大愈好;而在山区,大坡角的边坡能减少路堤的填方量。

而在路堑、水利工程施工中,加大边坡的坡角,同样也能取得减少土石方量的作用,从而降低建设成本。房屋建筑与市政建设中,边坡的稳定性一方面影响到建筑物的安全运营与使用,另一方面也影响到建设成本。露天采矿工程中,随着坡高的增加,加陡边坡成了减少废石开挖和运输量、提高矿山经济效益的一个有效措施,但是,随着矿坑边坡的加陡,边坡的稳定性问题随之而出,在给定坡高条件下能够稳定的边坡究竟能陡到什么程度,取决于场地的工程与水文地质条件、施工技术以及边坡的服务年限等。

总之,边坡工程涉及国民经济建设的各个方面,它一方面关系到其所维系的各种构筑物的安全及正常使用,另一方面同样也影响到构筑物的施工成本。

1.1.2 滑坡概念

滑坡通常是指由自然原因引发的正在蠕动与滑动的自然斜坡,称为自然滑坡;另一部分则是由于边坡开挖或填筑,而引发古老滑坡复活或自然滑坡加剧,从而引发大规模滑坡。

滑坡是常见的一种地质灾害,其频发性与严重性都相当惊人。我国是一个多山国家,滑坡相当频繁,如已查出三峡库区较大规模的崩滑体就有 2 490 个,又如 1981 年雨季宝成铁路发生滑坡 289 次,中断行车 2 个月。滑坡灾害的严重性也是众所周知的,滑坡灾害曾多次造成生命、财产的重大损失。

1.1.3 边坡与滑坡区别

边坡与滑坡可按下述特征来进行综合区别:

①边坡指由于工程原因而开挖或填筑的人工斜坡;而滑坡指由于自然原因而正在蠕动与滑动的自然斜坡。

②边坡在工程开挖与填筑前坡体内不存在滑面,但可以存在未曾滑动的构造面,开挖前坡体无蠕动或滑动迹象;滑坡在坡体中存在天然的滑面,坡体已有蠕动或滑动迹象。

③当人工斜坡内存在天然的滑面或引发古老滑坡滑面复活时,称为工程滑坡;当天然斜坡危及工程安全而需要治理时则称为自然边坡。

1.2 边坡工程

为满足工程需要而对自然边坡进行改造,称为边坡工程。

边坡按成因可分为自然边坡与人工边坡。天然的山坡和谷坡是自然边坡,此类边坡是在地壳隆起或下陷过程中逐渐形成的。人工边坡是由于人类活动(如开挖或填筑等)形成的边坡,如建筑边坡、水利水电工程边坡、矿山边坡、路基边坡、路堑边坡、基坑侧壁等,其中挖方形成的边坡为开挖边坡,填方形成的称为构筑边坡,也称为坝坡。人工边坡的几何参数根据工程建设的需要可以人为控制。

边坡稳定问题是工程建设中经常遇到的问题,如建筑的切坡、水库的岸坡、渠道边坡、隧洞

的进出口边坡、坝肩边坡、公路或铁路的路基路堑边坡、基坑侧壁等,都涉及稳定问题。边坡的失稳,轻则影响工程质量与施工进度,重则造成人员伤亡与国民经济的重大损失。因此,不论是土木工程还是水利水电工程,边坡的稳定问题经常成为需要重点考虑的问题。

边坡的稳定分析是边坡设计的基础,稳定性分析的前提是认识边坡,包括地质条件(区域地质、工程地质、水文地质、地应力水平、地质构造等)、岩土体室内及室外试验(确定岩土体的力学参数)、边坡的受力(边坡承受的荷载,包括恒载与活载)、力学分析等。其中,力学分析是建立符合客观实际条件的物理模型,选用适合特定条件的数学模型,定性分析岩土体的力学动态趋势和进行定量的力学成果分析和力学分析包括稳定性分析与岩土体的应力应变分析,两者缺一不可,稳定性分析是边坡工程稳定的必须条件,应力应变分析是边坡稳定的充分条件。在十分复杂的条件下,还应进行室内地质力学模型试验、离心机模拟试验等。

在稳定分析的基础上,应设计合适的支护措施,进行边坡支护,即为保证边坡及环境的安全,对边坡采取的支挡、加固与防护措施。常用的支护措施分为以下几种:

- ①挡土墙:承受土体侧压力的墙式构造物。
- ②抗滑桩:抵抗土压力或滑坡下滑力的横向受力桩。
- ③土钉:在土质或破碎软弱岩质边坡中设置钢筋钉以维持边坡稳定的支护结构。
- ④预应力锚杆(索):由锚头、预应力筋、锚固体组成,通过对预应力钢筋施加张拉力以加固岩土体使其达到稳定状态的支护结构。
- ⑤抗滑洞塞:岩质边坡体内用混凝土回填起抗滑作用的洞塞。
- ⑥坡面防护:包括用于土坡的各种形式的护砌和人工植被,用于岩质边坡的喷混凝土、喷纤维混凝土、挂网喷混凝土,以及柔性主动支护、土工合成材料防护等措施。
- ⑦喷锚支护:由锚杆和喷射混凝土面板组成的支护。
- ⑧减载:采用从边坡顶部开挖、削坡的方法,减少边坡自身荷载,提高边坡稳定性的措施。
- ⑨排水和防渗:包括坡面、坡顶以上地面排水、截水和边坡体排水等措施。
- ⑩其他措施:边坡压脚、注浆加固等措施。

在边坡设计与施工时,应注重动态设计与信息施工的运用。动态设计法是根据信息施工法和施工勘察反馈的资料,对地质结论、设计参数及设计方案进行再验证,如确认原设计条件有较大变化,及时补充、修改原设计的设计方法。信息施工法是根据施工现场的地质情况和监测数据,对地质结论、设计参数进行验证,对施工安全性进行判断并及时修正施工方案的施工方法。

边坡介质十分复杂,即使经过充分的研究,对它的认识水平也是介于定性和定量之间,因此,对边坡的监测十分重要,用以反馈技术决策的正确性。

要判定一个边坡是否稳定,其可能失稳变形的类型和性质是什么,滑动的范围有多大,滑动的方向和速度怎样,有无大滑动造成灾害的可能,危害范围有多大(远),其失稳滑动与哪些主要作用因素(降雨、地震、河流冲刷、人工开挖坡脚、堆载、水库水位升降,等等)有关系,这些因素的作用机制和变化幅度如何,以及在已有变形的坡体上进行工程施工如何保障施工的安全,加固和治理的边坡或滑坡其效果如何等问题,除了工程地质调查、测绘、勘探、试验和评价外,动态监测是十分重要和不可缺少的手段,尤其是对重要、高大复杂的边坡及大型复杂的滑坡。

监测主要包括裂缝监测、位移监测、滑动面监测、地表水监测、地下水监测、降水量监测、应力监测及宏观变形迹象监测等。

边坡工程监测是边坡研究工作中的一项重要内容,随着科学技术的发展,各种先进的监测

仪器设备、监测方法和监测手段的不断更新,边坡监测工作的水平正在不断的提高。

1.3 边坡稳定性研究的发展

边坡稳定性研究沿革已久,约有一个多世纪的历史,最早涉及边坡稳定问题的是英国学者赖尔(Laier, 1833),在他所著的《地质学原理》一书中,首次提及滑坡,并认为是地下水作用的结果。尔后,由于边坡稳定性研究的理论意义和实际价值,人们对凡是涉及地质问题的工程学科,几乎都开展边坡稳定性研究,特别是工业与民用建筑工程、水利水电工程、道路工程、矿山工程和国防工程等都广泛开展了边坡稳定性研究,取得了宝贵的经验和成果。

边坡发生破坏失稳是一种复杂的过程,由于边坡内部结构的复杂性和组成边坡岩石物质的不同,造成边坡破坏具有不同模式。对于不同的破坏模式就存在不同的滑动面,因此应采用不同的分析方法及计算公式来分析其稳定状态。目前用于边坡稳定分析的方法大体上可分为定性分析和定量分析两种。定性分析方法包括工程类比法和图解法(赤平极射投影、实体比例投影、摩擦圆法);定量分析方法主要有极限平衡法、有限元法、边界元、离散元及可靠度、模糊数学、灰色理论及神经网络分析法。

目前被广泛使用和讨论的极限平衡方法有瑞典圆弧法、简化 Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Price 法、Spence 法和 Fredlund-Krahn 法等。美国学者 James Michael Duncan 对 1970 年至 1995 年边坡稳定分析的条分法和有限元法的进展做了综述报告,对于各种条分法的计算精度和适用范围,得出以下几点经典的结论:

①在边坡几何形状、容重、强度指标和孔压确定的情况下,边坡稳定分析的图表法的结果基本满足精度,满足的程度取决于对实际的边坡简化的准确度。

②瑞典圆弧法在平缓边坡和高孔隙水压情况下进行有效应力法分析时是非常不准确的;该法的安全系数在 $\varphi = 0$ 分析中是完全精确的,对于圆弧滑面的总应力法可得出基本正确的结果;此法的数值分析不存在问题。

③简化毕肖普法在所有情况下都是精确的(除了遇到数值分析困难情况外),其局限性表现在仅仅适用于圆弧滑面以及有时会遇到数值分析问题。如果使用简化毕肖普法计算获得的安全系数比瑞典法小,那么可以认为毕肖普法中存在数值分析问题。基于这个原因,同时计算瑞典法和毕肖普法,比较其结果,是一个较好的选择。

④使用力的平衡的方法计算的安全系数对所假定的条间力方向极为敏感,条间力假定不合适将导致安全系数严重偏离正确值。

⑤满足全部平衡条件的方法(如 Janbu 法, Morgenstern-Price 法和 Spencer 法)在任何情况下都是精确的(除非遇到数值分析问题)。这些方法计算的成果相互误差不超过 12%,相对于一般认为是正确的答案的误差不会超过 6%,所有这些方法也都有数值分析问题。

随着计算机软件、硬件的飞速发展,采用理论体系更为严格的方法进行边坡稳定分析已经成为可能。有限单元法全面满足了静力许可、应变相容和应力、应变之间的本构关系。同时,因为是采用数值分析方法,可以不受边坡几何形状的不规则和材料的不均匀性的限制,应该是比较理想的分析边坡应力、变形和稳定形态的手段。

目前采用有限元分析边坡稳定主要有以下 3 类方法:对边坡作有限元分析;基于滑面上应力分析的有限元分析方法;有限元强度折减方法。

其他数值模拟方法还有边界元法、离散元法、流形方法、有限差分法等在第5章作详细介绍。

20世纪70年代发展的地质模型实验法能模拟不连续岩体的自然条件、岩体结构及其物理方程。典型边坡地质力学模型的建立对于边坡稳定性评价及其失稳形式的分类是非常有意义的。

目前,边坡稳定性评价方法很多,归结起来主要有以下6类。

①地质分析法:根据边坡的工程地质条件定性分析、判断边坡的稳定性。其不足之处是不能进行定量评价。

②经验类比法:通过大体相似的两个或多个边坡进行比较,根据它们的属性推出其他属性的相似性方法,这是一种定性评价方法。

③结构分析法:通过大量结构面统计,应用赤平投影、实体比例投影和摩擦圆方法判断边坡的稳定性,也是一种定性评价方法,难以量化。

④极限平衡分析法:该法把滑体作为刚体,分析其沿滑动面的平衡状态。常用的方法有Fellenius法、Bishop法、Sarma法,主要优点是简便。其缺点是把岩体作为刚体处理,不能反映岩体内部真实的应力-应变关系;稳定系数是滑动面上的平均值,带有一定的假定性,也无法考虑累进性破坏对稳定的影响;各种计算方法本身还有不同的假设,均有一定的适用范围和局限性,都是把超静定问题变为静定问题处理。

⑤数值分析法:在边坡稳定性评价中常用的数值分析法包括有限单元法、边界元法、离散元法等,这些数值分析方法本身有较高的精度,但受地质模型、简化的力学模型和力学参数等的影响,使“高精度”的计算结果,难以作出“高准确”的评价。

⑥概率分析法:该方法是以前极限平衡原理建立状态方程,在定值稳定系数方法基础上,计算边坡不稳定性概率的方法。该方法的优点是解决边坡稳定性中的不确定性问题。其缺点一是需要大量的统计样本;二是它是在极限平衡方法基础上建立起来的,因而包含极限平衡法的缺陷和局限性。

边坡稳定性评价研究已取得很大进展,但问题亦不少,无论哪一种评价方法都有自身的适应性和局限性,因而加快了新技术、新方法在边坡稳定性评价中的应用。近年来,非线性科学理论、非连续介质理论、可靠性分析理论以及计算机技术的发展,为边坡稳定性问题的研究提供了新的途径和方法,多学科、多专业的交叉渗透研究已成为边坡研究的发展方向。

但是,边坡岩土体是性质极其复杂的地质介质。长期的地质作用使其成为自然界最复杂的材料之一。它的力学特性参数、结构面分布规律、工程性质等都是复杂的、多变的,呈时空变化的,具有强烈的不确定性。这些不确定性主要来自3个方面:

①岩土体本身固有的不均匀性。

②工程参数量测和取样引入的误差。

③模型不准确引起的不确定性。

这些不确定性的客观存在给边坡稳定分析带来了巨大的困难。传统的边坡稳定性分析方法采用确定性的取定值分析方法,并没有获得令人满意的结果,在实际工程中出现了“边坡安全系数大于1发生破坏,而小于1却稳定”的现象。所以至今,边坡稳定性分析仍不能完全依赖于理论分析和数值计算,在许多情况下,主要依赖于工程类比和专家经验。耗散结构理论、协同学、突变理论、混沌理论、分形理论、神经网络理论等非线性科学的发展,给边坡稳定性研究提供