

高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材
(按高等学校土木工程本科指导性专业规范编写)

边坡工程

(地下工程专业方向适用)

沈明荣 主编

许 强 主审

中国建筑工业出版社

高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材
(按高等学校土木工程本科指导性专业规范编写)

边坡工程

(地下工程专业方向适用)

	沈明荣	主编
黄雨	石振明	副主编
	许强	主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

边坡工程/沈明荣主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 8

高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材(地下工程专业方向适用)

ISBN 978-7-112-18327-2

I. ①边… II. ①沈… 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(2015)第 175699 号

本教材根据高等学校土木工程学科专业指导委员会编制的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》编写而成。本教材一共分成 6 个章节, 主要介绍的内容包括: 边坡可能形成的滑坡、崩塌和泥石流等灾害的定义以及这三大灾害的形成机理以及各自的形态特征, 影响三大灾害形成的主要因素; 典型的滑坡工程实例以及边坡设计中的主要参数与工程费用的关系; 边坡工程勘察的具体要求及内容; 边坡岩土体的稳定性评价原理和方法; 由于开挖而形成的人工边坡的设计原理及方法; 边坡加固的主要原理和常用的加固方法。本教材将地质工程中边坡稳定性分析的内容与土木工程的相关设计原理和方法有机地联系在一起, 其宗旨是通过本教材的学习能够掌握边坡工程从岩土体的稳定性分析到结合相关的工程了解工程勘察的要点, 并在此基础上提出岩土体加固的具体措施等一整套的设计过程。

本教材主要为土木工程专业的本科生而编写, 可作为土木工程专业课程的教材, 也可作为其他相关专业的参考书。由于本教材具有较强的应用性, 也可作为相关专业的教师、研究生以及工程技术人员的参考书。

责任编辑: 王 跃 吉万旺

责任设计: 陈 旭

责任校对: 刘 钰 刘梦然

高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材

(按高等学校土木工程本科指导性专业规范编写)

边坡工程

(地下工程专业方向适用)

沈明荣 主编

黄 雨 石振明 副主编

许 强 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13 $\frac{3}{4}$ 字数: 282 千字

2015 年 11 月第一版 2015 年 11 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-18327-2

(27594)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本系列教材编审委员会名单

主任：李国强

常务副主任：何若全 沈元勤 高延伟

副主任：叶列平 郑健龙 高波 魏庆朝 戚大庆

委员：（按拼音排序）

陈昌富	陈德伟	丁南宏	高辉	高亮	桂岚
何川	黄晓明	金伟良	李诚	李传习	李宏男
李建峰	刘建坤	刘泉声	刘伟军	罗晓辉	沈明荣
宋玉香	王跃	王连俊	武贵	肖宏	徐蓉
徐秀丽	许明	许建聪	杨伟军	易思蓉	于安林
岳祖润	赵宪忠				

组织单位：高等学校土木工程学科专业指导委员会

中国建筑工业出版社

出版说明

近年来,高等学校土木工程学科专业教学指导委员会根据其研究、指导、咨询、服务的宗旨,在全国开展了土木工程学科教育教学情况的调研。结果显示,全国土木工程教育情况在2000年以后发生了很大变化,主要表现在:一是教学规模不断扩大,据统计,目前我国有超过400余所院校开设了土木工程专业,有一半以上是2000年以后才开设此专业的,大众化教育面临许多新的形势和任务;二是学生的就业岗位发生了很大变化,土木工程专业本科毕业生中90%以上在施工、监理、管理等部门就业,在高等院校、研究设计单位工作的本科生越来越少;三是由于用人单位性质不同、规模不同、毕业生岗位不同,多样化人才的需求愈加明显。土木工程专业教指委根据教育部印发的《高等学校理工科本科指导性专业规范研制要求》,在住房和城乡建设部的统一部署下,开展了专业规范的研制工作,并于2011年由中国建筑工业出版社正式出版了土建学科各专业第一本专业规范——《高等学校土木工程本科指导性专业规范》。为紧密结合此次专业规范的实施,土木工程教指委组织全国优秀作者按照专业规范编写了《高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材(专业基础课)》。本套专业基础课教材共20本,已于2012年底前全部出版。教材的内容满足了建筑工程、道路与桥梁工程、地下工程和铁道工程四个主要专业方向核心知识(专业基础必需知识)的基本需求,为后续专业方向的知识扩展奠定了一个很好的基础。

为更好地宣传、贯彻专业规范精神,土木工程教指委组织专家于2012年在全国二十多个省、市开展了专业规范宣讲活动,并组织开展了按照专业规范编写《高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材(专业课)》的工作。教指委安排了叶列平、郑健龙、高波和魏庆朝四位委员分别担任建筑工程、道路与桥梁工程、地下工程和铁道工程四个专业方向教材编写的牵头人。于2012年12月在长沙理工大学召开了本套教材的编写工作会议。会议对主编提交的编写大纲进行了充分的讨论,为与先期出版的专业基础课教材更好地衔接,要求每本教材主编充分了解前期已经出版的20种专业基础课教材的主要内容和特色,与之合理衔接与配套、共同反映专业规范的内涵和实质。此次共规划了四个专业方向29种专业课教材。为保证教材质量,系列教材编审委员会邀请了相关领域专家对每本教材进行审稿。

本系列规划教材贯彻了专业规范的有关要求,对土木工程专业教学的改革和实践具有较强的指导性。在本系列规划教材的编写过程中得到了住房和城乡建设部人事司及主编所在学校和单位的大力支持,在此一并表示感谢。希望使用本系列规划教材的广大读者提出宝贵意见和建议,以便我们在重印再版时得以改进和完善。

高等学校土木工程学科专业指导委员会
中国建筑工业出版社
2014年4月

前 言

随着我国经济建设不断发展,由于开挖岩体而形成的边坡工程日益增多,进而使得边坡的稳定评价和边坡的加固措施已成为一项极为重要的工程技术。对于边坡工程的知识体系,已有一些相关的教材按照各自专业领域的特点进行了介绍,其中比较突出的是地质工程专业。然而,近十几年来土木工程的建设项目也越来越多地涉及类似的问题,即由于岩土体的开挖而形成的边坡稳定性以及为了保证边坡稳定所必须采取的工程加固措施等工程技术问题,这已成为工程建设中的一个重要的环节。纵观以往有关的教材,大多将边坡岩土体的稳定性评价作为主要内容,而专门为土木工程专业编写的,且涉及边坡设计的相关教材比较少见。据此,高等学校土木工程学科专业指导委员会依据最新制定的《土木工程本科指导性专业规范》,提出了一套符合当前土木工程建设所需知识体系,并组织编写了包含边坡工程的系列教材。

本课题组有幸承担本教材的编写工作,在教材的编写过程中,教材编写组成员始终抓住边坡工程和土木工程相结合的宗旨,根据总体的知识点自然形成了两条线。一条以地质工程知识点为主线,着重介绍边坡岩土体破坏类型和破坏机理及岩土体稳定性评价的原理和方法;另一条线结合土木工程的勘察和设计,重点介绍边坡工程设计过程中各个阶段的主要内容以及边坡工程加固岩体的常用措施。本教材的最终目的在于通过本科阶段的学习,能够掌握边坡失稳的主要形式和相关机理,并初步掌握依据不同的破坏形式设计出与工程相适应的加固措施。

本教材的编写组由同济大学土木工程学院地下建筑与工程系城市工程地质与环境地质研究所的教师组成。其中第1、2章由沈明荣教授编写,第3章由张清照博士编写,第4章由黄雨教授编写,第5章由石振明教授编写,第6章由石振明教授与张清照博士编写。全书由沈明荣教授负责统稿。在完成初稿后,邀请了成都理工大学的许强教授作为本教材的主审,许强教授提出了许多宝贵意见和建议,在此,对许强教授的无私奉献表示衷心的感谢!

由于本教材编写组成员的水平有限,在教材中必定还存在着一定的错误和不足,希望能得到广大读者的批评指正。也期盼着各学校的教师和学生在使用本教材的过程中及时反馈相关的意见和建议,使得边坡工程教材更趋完善。

编者

2014. 10. 30

目 录

第1章 边坡工程概述	1	3.2.1 边坡勘察工作大纲	58
1.1 边坡的类型	1	3.2.2 边坡调查测绘	58
1.1.1 按边坡形成的机理分类	2	3.2.3 边坡勘探	60
1.1.2 按组成边坡坡体的介质分类	2	3.2.4 边坡岩土试验	61
1.1.3 按边坡坡体的高度分类	3	3.2.5 边坡工程监测	62
1.1.4 按边坡岩体结构的分类	3	3.2.6 边坡稳定性评价	64
1.1.5 按边坡服务时间的分类	4	3.2.7 边坡勘察报告	66
1.2 边坡灾害	4	3.3 滑坡勘察	67
1.2.1 滑坡破坏	5	3.3.1 滑坡形成条件及分类	67
1.2.2 崩塌破坏	5	3.3.2 滑坡勘察的目的和任务	69
1.2.3 泥石流	6	3.3.3 滑坡调查测绘	70
1.3 边坡破坏的典型实例	6	3.3.4 滑坡勘探	71
1.3.1 意大利瓦伊昂滑坡	6	3.3.5 滑坡监测	72
1.3.2 新滩滑坡	9	3.4 危岩和崩塌勘察	73
1.4 边坡的稳定与造价的关系	11	3.4.1 危岩和崩塌勘察目的和任务	73
1.4.1 边坡失稳对工程费用的影响	12	3.4.2 危岩和崩塌调查测绘	73
1.5 小结及学习指导	16	3.4.3 危岩和崩塌勘探	74
习题	17	3.4.4 危岩和崩塌监测	75
第2章 边坡的破坏类型、特征及机理	18	3.5 勘察资料的分析与整理	75
2.1 概述	18	3.6 小结及学习指导	76
2.2 边坡的破坏类型	18	习题	77
2.2.1 滑坡	19	第4章 边坡稳定性分析与评价	78
2.2.2 崩塌	33	4.1 概述	78
2.2.3 泥石流	44	4.2 工程地质类比法	79
2.3 小结及学习指导	55	4.2.1 基本原理	79
习题	55	4.2.2 案例分析	80
第3章 边坡设计的地质勘察方法	56	4.3 圆弧形滑坡稳定性分析	81
3.1 概述	56	4.3.1 基本原理	81
3.1.1 边坡勘察的基本要求	56	4.3.2 最危险滑动面圆心位置的确定	83
3.1.2 边坡勘察的一般规定	57	4.3.3 例题	85
3.2 边坡勘察	58	4.4 平面形滑坡稳定性分析	86
		4.4.1 基本原理	87

4.4.2 例题	87	5.4.1 钢筋混凝土格构加固	148
4.5 楔形块体滑动滑坡稳定性分析	88	5.4.2 预应力混凝土格构加固	148
4.5.1 基本原理	88	5.4.3 预应力锚索格构内力计算 原理	149
4.5.2 例题	89	5.5 抗滑桩	153
4.6 折线形滑坡稳定性分析	90	5.5.1 抗滑桩类型及特点	153
4.6.1 基本原理	90	5.5.2 抗滑桩破坏类型	153
4.6.2 例题	92	5.5.3 抗滑桩设计计算基本原理	154
4.7 赤平极射投影法和实体比例投 影法	93	5.5.4 抗滑桩设计	159
4.7.1 赤平极射投影的基本原理	93	5.6 加筋土挡墙	160
4.7.2 赤平极射投影作图	94	5.6.1 加筋土技术发展概况及其 特点	160
4.7.3 赤平极射投影法实例	95	5.6.2 加筋土挡墙的设计原理	161
4.7.4 实体比例投影法的基本原理	96	5.6.3 加筋土挡墙的稳定性分析	161
4.7.5 例题	96	5.6.4 加筋土挡墙的材料及构造 设计	163
4.8 数值分析方法	98	5.7 土钉墙	165
4.8.1 数值分析方法简介	98	5.7.1 土钉墙结构设计	165
4.8.2 案例分析	104	5.7.2 土钉墙稳定性分析	166
4.9 边坡稳定性评价	108	5.8 锚杆	170
4.9.1 综合评价	108	5.8.1 岩土锚固技术概述	170
4.9.2 敏感性分析	109	5.8.2 锚杆的分类与受力特点	172
4.9.3 安全系数的选用	109	5.8.3 锚杆(索)在边坡防治中的 应用	175
4.10 小节及学习指导	110	5.9 小结及学习指导	176
习题	111	5.9.1 本章小结	176
第5章 边坡工程防护技术及加固 处理方法	112	5.9.2 学习指导	176
5.1 概述	112	习题	177
5.1.1 防治原则	112	第6章 边坡设计的基本方法	178
5.1.2 防护技术及加固处理方法	113	6.1 边坡工程设计概述	178
5.1.3 边坡排水措施	115	6.1.1 边坡工程设计原则	179
5.2 重力式挡土墙	125	6.1.2 边坡工程设计基本要求	180
5.2.1 重力式挡土墙的类型及使用 条件	125	6.1.3 边坡支护结构形式	181
5.2.2 构造要求	127	6.2 边坡坡率坡形设计	183
5.2.3 稳定性分析及设计计算过程	132	6.2.1 概述	183
5.3 悬臂式和扶壁式挡土墙	134	6.2.2 填方边坡	185
5.3.1 悬臂式挡土墙	134	6.2.3 挖方边坡	186
5.3.2 扶壁式挡土墙	143	6.2.4 构造设计	188
5.4 格构锚固	147		

6.3 边坡支护设计	189	6.3.7 边坡绿化与美化设计	198
6.3.1 总则	189	6.4 滑坡防治设计	201
6.3.2 边坡支护结构侧向岩土压力 计算	190	6.4.1 滑坡防治设计的原则	201
6.3.3 锚杆(索)设计计算	191	6.4.2 滑坡防治的主要工程措施	203
6.3.4 重力式挡土墙	194	6.5 危岩和崩塌防治设计	205
6.3.5 扶壁式挡土墙	196	6.6 小结及学习指导	207
6.3.6 防排水设计	198	习题	208
		参考文献	209

本章知识点

知识点：介绍边坡工程中的基本概念及其对于土木工程的影响；通过典型工程以及工程灾害实例的介绍，了解边坡工程的重要性；扼要地介绍边坡工程的造价与边坡稳定性之间的相互关系；阐述边坡工程研究（设计）的整体思路。

重点：边坡工程中岩土体稳定的重要性，合理地考虑岩土体的稳定与工程造价之间的关系。

难点：在安全的前提下，以最经济的工程造价建设工程。

山地斜坡是自然界最常见的一种地形，而边坡是在交通、能源、采矿等各类工程建设中由于开挖山体而最常用的一种工程措施。因此，无论是边坡还是斜坡构成其介质的岩土体稳定与否将直接影响正常的工程建设和运营，影响人们的生活。斜坡岩土体的失稳是我国常发的主要的地质灾害之一，而由于工程开挖后所形成的边坡，其岩土体的稳定与否又是众多岩土工程中所涉及的重要的工程问题之一。因此，在岩土工程建设过程中，凡进行岩土开挖的工程项目，能否保持其开挖后被遗留下的岩土体的稳定，将直接影响工程的后期施工建设和正常运营。此外，由于边坡的失稳所造成的经济损失与相关工作人员的生命危害，也将产生巨大的社会效应。据此，岩土工程建设包括工程完成正常营运阶段，必须保证由开挖而形成的边坡稳定。由此，在进行相关的岩土工程建设中，应该依据工程的实际情况，充分地掌握工程建设地区的地质条件，提出合理的施工方案，充分地考虑各类影响因素评价边坡的稳定性，并设计出既经济又安全的工程措施，以保证边坡的长期稳定。同时，还应对自然山地的斜坡给予足够的重视，尤其是坡脚下有着人类居住或者经常活动的场所，由于斜坡岩土体的失稳往往速度快，失稳的岩土体方量大，稍不注意将造成巨大的生命财产损失。

1.1 边坡的类型

边坡是人类工程建设中开挖岩土体后，经常采用的一种工程措施，通常也指在长期的自然营力作用下所形成的山体中的一种自然形态。因此，边坡是自然斜坡和人工开挖的边坡的统称，有人也将斜坡作为自然形成的边坡的

专用名词。对于边坡形态特征的描述,通常借用地质学中关于岩层的产状的描述方法,即采用走向、倾向和倾角的方法,就可唯一地表述坡面的空间几何形态。所谓的走向是指坡面与水平面交线的方位角(图1-1中的 $\alpha \pm 90^\circ$);倾向是指垂直走向顺坡面向下倾斜引出一条直线,该直线在水平面上投影线的方位角(图1-1中的 α 角);倾角是指坡面与水平面夹角(图1-1中的 φ 角)。

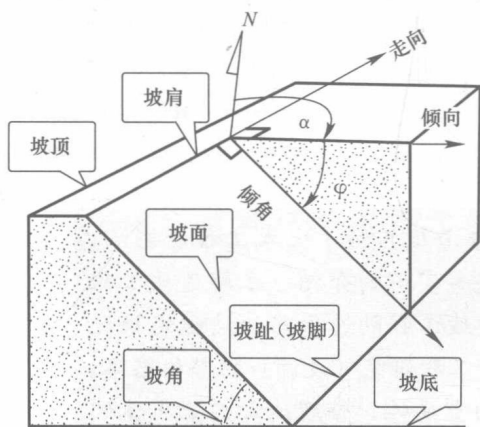


图1-1 坡面的产状和边坡几何形态示意图

此外,对于边坡几何形态的表述通常可用以下几个专用名词(参见图1-1),坡面:指边坡倾斜的表面;坡高:指边坡的坡脚到坡顶的高度;坡角:即上述坡面的倾角;坡顶:处在边坡最高位置的顶面;坡底:边坡面最低的表面;坡趾(坡脚):边坡面与坡底相交的位置;坡肩:坡面与坡顶相交的位置。

边坡的形态特征与组成边坡岩土体的工程地质条件有着一定的联系。因此,掌握边坡的形态特征,对于采用何种稳定性评价的方法和采用何种加固措施都是必不可少的重要资料。人们为了正确地认识边坡的形态特征,通常按边坡所表现出的一定规律,分门别类地划分成不同的边坡类型。边坡的类型根据其不同的外观条件有很多种不同类型的分类方式,其中最常用的有按边坡形成的机理分类;按组成边坡坡体的介质分类;按边坡坡体的高度分类;按边坡岩体结构的分类;按边坡的工程作用分类等方法。

1.1.1 按边坡形成的机理分类

如果按形成边坡的方式进行分类,可以将边坡分成人工边坡和天然边坡。前者是由于工程开挖而形成的边坡,直接与土木工程的建设有关。因此,本教程将着重介绍由于人工边坡而产生的工程问题。人工边坡的形态特征主要取决于岩土体的工程地质条件和岩土体的强度特性。岩土体强度较高时设置的边坡坡角可以大一些,以减少相应的工程量,相反需要减缓坡角,有的甚至需要设置支挡构筑物以保持岩土体的稳定。天然边坡习惯上被称作斜坡,顾名思义是在自然的条件下所形成的边坡。它的形态特征主要取决于岩土体的地质构造的作用。在地质构造相对比较简单的地区,斜坡的坡度一般比较平缓,此时的边坡相对也比较稳定;而在地质构造比较复杂同时又受到河流侵蚀切割的地区,这种类型的边坡大都比较陡,有的形成所谓的悬崖峭壁,该类型的边坡稳定性相对较差,经常会出现一些岩土体失稳的现象。

1.1.2 按组成边坡坡体的介质分类

有时为了评价边坡稳定性的需要,及时地了解边坡的安全系数,将按组

成边坡坡体的介质成分进行分类。根据组成边坡坡体的介质不同,可以将边坡分成三大类:岩质边坡、土质边坡和岩土混合边坡。岩质边坡是指坡体的介质由岩体组成,大多数工程建设中所遇到的都属这一类的边坡。根据工程地质条件和岩体的强度特征,岩质边坡的主要破坏模式是沿着岩体中的某些强度很低的结构面产生剪切滑移,而此类的边坡破坏相对规模比较大,危害性也就比较严重。土质边坡是指坡体介质都是由土体组成,由于土体相对比较均质,强度也比岩体要低得多,一般土质边坡的坡高和坡角都不会设置得太大,因此,其边坡破坏的规模一般不会太大。根据大量的工程实践可知,大多数土质边坡的破坏仍然可以按剪切破坏进行计算,此时其土体将在坡体中形成圆弧状滑动面而产生破坏。岩土混合边坡是指边坡坡体的介质同时由土体和岩体组成,由于两种介质混合,造成可能产生的破坏机理相对比较复杂,总体上会按某种占比例较多的介质特征产生破坏,这一切还应依据坡体的工程地质条件确定。

1.1.3 按边坡坡体的高度分类

由于工程建设的需要,有时岩土体开挖后所形成的边坡坡体的高度很高,这会给边坡的稳定性造成很大的影响。因此,为了突出高边坡的安全要求,我国《建筑边坡工程技术规范》GB 50330—2013 提出了高边坡的概念,并按边坡坡体的高度进行一种比较特殊的分类方式。根据规范中对边坡高度的规定,对岩质边坡超出 30m、土质边坡超出 15m 的边坡必须进行专门的认证和特殊的设计。甚至一些大中型城市为了保证工程建设的安全,对于软土地基的开挖深度大于 6m 的基坑都将进行围护结构的合理性论证,通过相应的专家评审后才能进行施工。

目前,在土木工程的建设中,由于建筑场地的限制,许多工程通过开挖而设置高边坡情况越来越多。由于开挖后裸露的岩土体相对比较多,从力学特征上来说,主要表现为坡体变形大,失稳后可能造成的危害大。因此,其稳定性问题也就越发重要。高边坡的破坏机理主要取决于工程地质条件,包括结构面的发育程度、岩土体的强度、地下水的作用状态等。

1.1.4 按边坡岩体结构的分类

在岩质边坡中由于岩体的强度、地质构造的影响和结构面发育程度的不同,使得组成边坡的岩体表现出极为不同的特征,由此会对边坡破坏的机理产生很大的影响。因此,有人依据不同的岩体结构,对所形成的边坡形态进行分类。

所谓的岩体结构是指结构面的发育程度及其组合关系,或者说是结构体的规模、形态和排列形式所表现的空间形态。岩体结构由两大要素组成:即结构面和结构体。中科院地质研究所根据我国实际的地质情况及岩体中结构面发育的状态,提出了岩体结构的分类方法,将岩体分成:块状结构、层状结构、镶嵌结构、层状镶嵌结构、碎裂结构、散体结构。

由于岩体结构的不同,将对边坡坡体的形态特征和边坡岩体的破坏模式

造成很大的影响。因此,为便于对此类边坡的稳定性选择对应的评价方法,一般按照岩体结构的基本规律划分边坡的类型。通常以岩质边坡中不同的岩体结构类型将岩质边坡划分成不同的边坡类型,其主要的种类如下:

(1) 水平岩层状边坡:主要是由近似水平岩层作为介质所形成的边坡。该类边坡由于岩层的层面呈水平状,使得边坡岩体的稳定性相对较好,尤其是层面间距较大的岩层,边坡岩体失稳的可能性较小。

(2) 顺坡向层状边坡:指岩层具有一定的倾斜角度,且岩层的倾向与边坡坡面的倾向相同,而被称作顺坡向的层状边坡。由于岩体开挖,使得顺坡向的岩层在开挖面上出露,因此很容易引起上覆岩体沿着层面向下滑动。因此,顺坡向的层状边坡其稳定性相对比较差,是应该给予足够重视的边坡。

(3) 反坡向层状边坡:主要是由层状岩体的倾向与边坡的坡向相反的层状岩体组成。由于岩体的倾向与坡向相反其稳定性相对比较好,大多数该类边坡是稳定的。

(4) 块状岩体边坡:主要由厚层块状岩体所组成的边坡。总体上该类岩体边坡的稳定性相对比较好。

(5) 碎裂状岩体边坡:该类边坡是由结构面极为发育,岩体被切割成碎裂状或者有断层的破碎带等岩体组成。由此可见,该类边坡的稳定性较差。

(6) 散体状边坡:边坡主要的介质为岩石的碎块、砂等组成。这类边坡的介质属于散体,强度很低。因此,其稳定性也是属于较差的一类。

1.1.5 按边坡服务时间的分类

在实际的工程中岩土体开挖所形成的边坡,是为不同的工程服务的。有的是形成一个永久的边坡,其服务的年限与工程的服务年限相同,例如,铁路隧道的切口所形成的路堑边坡,选择沟谷为高速公路时,开挖所形成的边坡等都属此类。当然,还有一类边坡是属于临时性质的,此类边坡的服务年限仅限于施工期间,工程完成之后这类边坡又进行重新处理。最典型的是基础开挖后采用结构物来充填开挖的空间,原先的支挡结构也都是临时性的。很明显,不同的服务年限对于边坡的形态、支挡结构的形式等都会提出不同的要求,包括在进行稳定性计算时,可能采用的安全系数都会稍有差别。因此,有人按照这样的一个特点,按边坡为工程的服务年限分成了永久边坡和临时边坡,同时要求这两种不同边坡各自所具有的特征,来评价边坡的稳定性,设计相应的支挡结构。

边坡实际的种类还应该有许多中,如按边坡坡面的形态还可以分成台阶状、凹状和凸状等边坡,还可以按不同的工程对象分成开挖而成的边坡等。不管何种类型的边坡,其最重要的是依据各类边坡的特征,能够清晰地分析边坡破坏的机理,并合理地计算其稳定性,设计出既能保持稳定又经济的加固措施,保证工程施工和运营的安全进行。

1.2 边坡灾害

无论是在自然营力作用下所形成的天然边坡,还是在工程建设中由于构

筑物设置的需要开挖而形成的人工边坡，在自身的地质条件和外部环境、气候条件的作用下，将会由于岩土体的破坏失稳而产生边坡灾害。无论是天然边坡还是人工边坡所形成的坡体失稳都将对人类造成很大的危害，这些灾害不仅将产生人类财产的损失，严重的灾害甚至将会吞噬人类的生命。因此，如何判断边坡岩土体的破坏类型及其破坏机理，提早预测边坡灾害的发生，已成为岩土工程界的一个重要研究课题。

通过大量的边坡灾害的分析研究，产生边坡灾害的主要原因可以大致分成两大重要原因：组成边坡坡体介质工程地质条件（可以称作内因）和边坡外围的环境包括工程建设对岩土体等的影响（可以称作外因）。作为内因条件主要包括组成坡体的岩土体介质的岩性组构，岩土体的地质构造，岩土体的强度和变形特征，地下水活动情况等，其中地质构造的影响又可分成结构面的空间分布特征、边坡所处的地质构造位置、地下水的流量和孔隙水压力的大小等。边坡影响因素的外因除了当地气候降雨的影响外，对于人工边坡而言，施工过程中所采用的方法以及边坡支护措施等，也将成为边坡稳定的主要影响条件，其中还包括形成边坡的几何尺寸、边坡的走向与地质构造之间的关系、岩土体开挖的方式和顺序、边坡支护结构的形式等。

综合上述产生边坡灾害的主要因素，在这些因素的组合作用下，边坡岩体可能产生由于岩体失稳而形成各种类型的破坏。破坏的形式主要表现为三大类：滑坡、崩塌和泥石流。

1.2.1 滑坡破坏

边坡的滑坡破坏是指斜坡岩土体在自重作用下失去原有的稳定状态，沿着斜坡内某一个滑动面或滑动带作整体向下滑动的现象。这一类型是边坡岩土体最主要的破坏形式。该破坏类型中的滑动面，在土体中以圆弧为主，岩质边坡中依据结构面分布的特征，有沿单一结构面的平面滑动，有沿着两组或两组以上结构面的切割形成楔形体滑坡；甚至受多组结构面的切割，形成形态比较特殊的滑坡体滑动，如畚箕形等。

滑坡破坏的主要类型可以归纳为以下几种：

(1) 平面破坏，主要发生在岩质边坡中，其破坏面是由相对规模较大的结构面，可以是岩层面、较大规模的节理和软弱夹层以及断层面等组成。其破坏特征是在岩体的自重作用下，沿着一组结构面产生剪切滑动。

(2) 楔形体破坏，主要发生在结构面比较发育的岩层中。由于岩土体受两组结构面的切割而形成楔形体，此楔形岩体在自重作用下沿两组结构面的组合交线或者更复杂的状态发生剪切滑动。

(3) 圆弧破坏，这种破坏模式主要发生在土质边坡和碎块体组成的岩质边坡中，因其滑动面可以近似看成圆弧形而得名。

1.2.2 崩塌破坏

崩塌通常是指陡峻或极陡峻斜坡上，某些大块或巨块岩石突然崩落或滑

落,顺山坡猛烈翻滚跳跃,岩块相互撞击破碎,最后堆积于坡脚下的这一现象。主要发生在垂直结构面比较发育的岩层中,通常情况是由于岩体开挖后,临空面失去原有的支撑力而产生较大的水平位移,造成岩块体的重心偏离了截面的形心,最终塌落的岩块翻滚掉落在坡角下。该类岩体破坏的特征主要表现在破坏岩体所产生的垂直位移大于水平位移,且破坏的规模一般不是很大。倾倒破坏也可以说是崩塌破坏的一种。

1.2.3 泥石流

泥石流通常是指在山区一些流域内,在大雨或暴雨降落时所形成的固体物质(主要由石块、砾砂黏粒等组成)在饱和状态下暂时性的山地洪流。它具有发生突然,运动速度快,破坏力强的特征。

1.3 边坡破坏的典型实例

作为地质灾害的主要表现形式之一,滑坡给人类带来了巨大的损失,甚至造成了重大的人员伤亡。在工程建设的过程中,只要掌握工程中所涉及的岩土体的工程地质条件,选择合理的工程措施,并对这一问题给予足够的重视,很多由于边坡失稳所造成的灾害事故是完全可以避免的,反之对于边坡的工程地质条件没有足够的认识,甚至未将工程中的边坡作为工程安全的重要环节,这一切都将引起严重的后果,造成巨大的损失。有人比喻边坡的岩土体是一头沉睡的狮子,当它形成了滑坡,就如睡醒的狮子,将给人类造成很大的麻烦。从工程建设费用上来说,整治滑坡所增加的工程费用的投入将是原有边坡处理费用的好几倍。滑坡不仅造成了施工工期的延长和经济上的损失,同时由于工程的事故也必将造成巨大的社会效应。本小节将介绍两例典型的工程事故,意大利的瓦伊昂水库滑坡和我国的新滩滑坡。前者由于对岩体的认识不足,造成了巨大的人员和财产损失,而后者由于科学技术的发展,工程技术人员对于边坡工程的正确认识,预先分析了岩体失稳的可能性,并在进行了大量工作的基础上,准确地预测了滑坡的发生,从而避免了人员的伤亡。这两个典型的工程事故实例,明确地告诉我们,尽可能地掌握与建设工程相关地区的地质资料,合理地分析边坡产生灾害的可能性,正确地选择边坡工程的相关措施,适当地设置施工过程和运营阶段的现场工程监测,是能够控制住边坡的安全问题,以保工程正常的运营。

1.3.1 意大利瓦伊昂滑坡^[12]

1.3.1.1 瓦伊昂河谷地质地貌及大坝工程

瓦伊昂水库建在意大利北部阿尔卑斯山地的瓦伊昂河谷中,坐落在著名的威尼斯市以北约100km处。河流由深切峡谷及上叠U形冰川谷构成,地处一不对称向斜之中,岸坡由侏罗系灰岩和上侏罗系的夹泥岩灰岩以及白垩系灰岩组成。滑坡发生前向斜轴部靠近左岸,为一倾向河谷的椅状斜坡,后缘

倾角约 40° ，至河谷近于水平（图 1-2）。

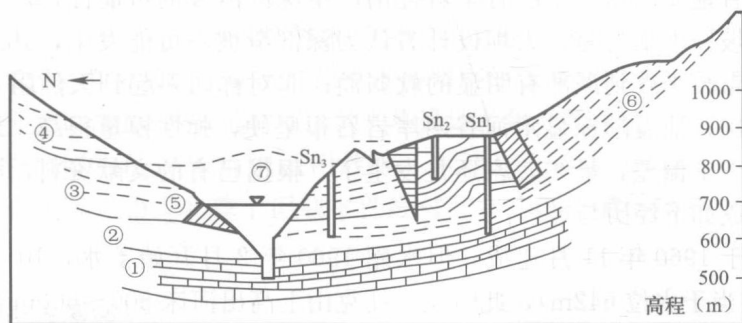


图 1-2 瓦伊昂水库滑坡滑动前地质剖面 and 位移观测示意图^[1]（据 L. Muller, 1964）

- ①-灰岩；②-含黏土夹层的薄层灰岩（侏罗系）；③-含燧石灰岩（白垩系）；④-泥灰质灰岩（白垩系）；
⑤-老滑坡；⑥-滑移面；⑦-滑动后地面线；Sn₁、Sn₂、Sn₃-钻孔及编号

瓦伊昂水库是意大利北部阿尔卑斯山修建的抽水蓄能发电站系列水库之一，设计水位 722.5m，库容 1.5 亿 m^3 ，用于核发电调节。大坝建在纵向谷的近水平岩层之上，坝高 267m，是当年世界最高的双曲薄拱坝，设计者吸取马尔帕萨拱坝失事的教训，两岸坝肩采取了系列混凝土板梁锚索加固工程，滑坡发生时，库水涌高超出现坝顶 125m（最大值）宣泄而下，大坝却安然无恙。滑坡造成了灾难，但却检验了大坝坝肩加固工程。

1.3.1.2 瓦伊昂水库滑坡灾难

瓦伊昂水库大坝始建于 1956 年，1960 年 9 月建成，1960 年 2 月开始蓄水。大坝蓄水后，至 1963 年 10 月，左岸托克山山体突然以高达 25~30m/s 速度沿层面下滑，约 2.7 亿 m^3 的岩土体向北滑动了 500m，滑入水库并推至对岸。掀起的库水高出坝顶 125m，约 2500 万 m^3 的库水宣泄而下，摧毁了下游 3km 处的隆加罗市及其下游数个村镇，造成 2000 余人丧生。瓦伊昂水库滑坡区平面图如图 1-3 所示。

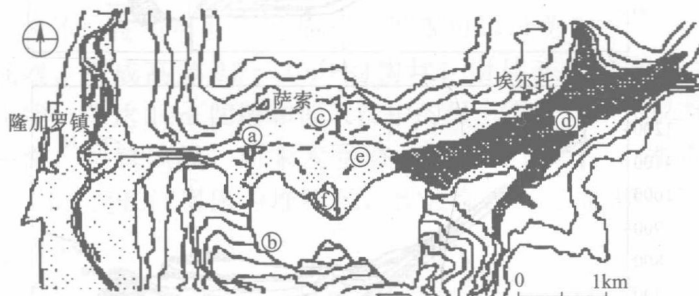


图 1-3 瓦伊昂水库滑坡区平面图（据 D. 罗西、E. 塞曼扎，1965）

- ①-大坝；②-滑坡源；③-涌浪及气浪压力波及区；④-湖；⑤-滑坡下界

1.3.1.3 瓦伊昂水库滑坡形成过程

在 1956 年的勘测与施工过程中，已发现库内紧靠左坝肩山体有变形迹

象,但直到大坝建成以后,仍未对其稳定性及发展趋势作出明确判断。根据瓦伊昂河谷地质结构,早已有学者提出产生深部滑坡的可能性,甚至认为存在一老滑坡。不幸的是,大坝设计者认为深部滑坡不可能发生,其理由为以下三点:钻孔未查到深部有明显的软弱面;非对称向斜起到天然阻止斜滑坡移动的作用;地震勘探显示河谷两岸岩石很坚硬,弹性模量很高。显然上述的论点发生了偏差,最终悲剧还是发生了。根据已有的文献资料,滑坡的形成可概括成如下经历与过程:

大坝于1960年11月建成,但水库1960年2月开始蓄水,10月水深达170m(相当于水位642m),此时左岸托克山上高出河床500~600m部位出现了长约2km的拉裂缝,外形呈M形,位移速度最大达到3.5cm/d。11月当水深达到180m(相当于水位652m),左岸发生了约70万 m^3 的岩质滑坡滑入水库,水库浪高2m,大坝处浪爬高10m。基于上述的情况,设计部门认为水位上升引起孔隙水压力上升是造成滑坡发生的关键因素,并认定降低库水位上升速度可以阻止滑坡的发展。这一措施延续到1963年上半年,似乎收到了一定效果。4~5月期间,水库水深从195m快速上升到230m(相当于水位702m,图1-4),斜坡位移轻微上升,但未超过0.3cm/d。然而到了7月中旬,水深增至240m(水位710m),某些控制观察点显示位移达到了0.5cm/d,尽管水位保持至8月中旬,但斜坡位移速度继续增加到0.8cm/d。到了9月初,水深245m(水位715m),此时位移速度已增至3.5cm/d,较前增加了一个数量级。9月下旬,为了降低位移速度而采取了缓慢降低水位至水深235m(水

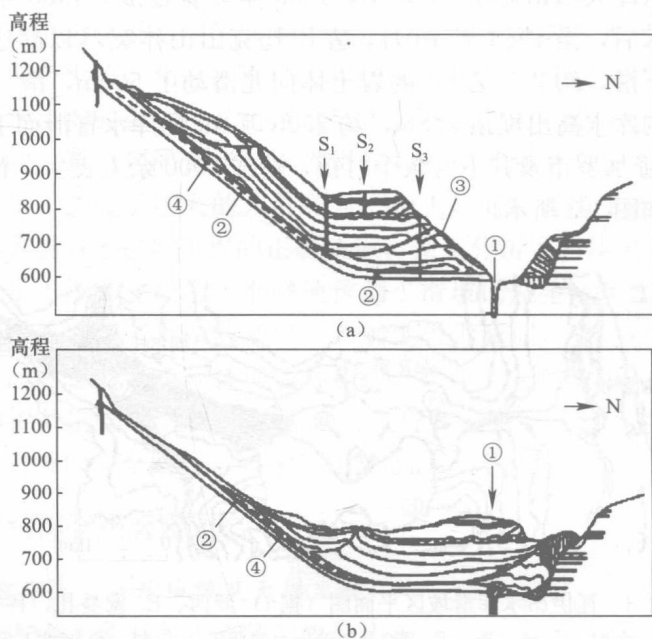


图1-4 瓦伊昂水库滑坡前后剖面示意图(据D. 罗西、E. 塞曼扎1986)

(a) 滑坡前;(b) 滑坡后

①-瓦伊昂河谷;②-老滑坡滑动面;③-1960年滑坡滑动面;④-1963年滑坡滑动面;S₁、S₂、S₃-钻孔及编号