



普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材

土木工程专业研究生系列教材

边坡工程学

重庆大学 张永兴 主编

Master of Civil Engineering



中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材
土木工程专业研究生系列教材

边坡工程学

重庆大学 张永兴 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

边坡工程学/张永兴主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2008

普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材. 土木工程专业研究生系列教材
ISBN 978-7-112-09942-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 040301 号

本书共分 7 章, 主要内容包括: 第 1 章绪论, 介绍了边坡破坏的主要形式及其影响因素、边坡工程学的主要内容和研究方法; 第 2 章边坡稳定性分析方法, 讲述了边坡稳定性的判别准则以及常用边坡稳定性分析方法; 第 3 章边坡岩体水力特性, 分析了边坡岩体的水力学特性及边坡常用排水处理方案; 第 4 章边坡工程防治技术, 介绍了边坡工程防治设计的基本程序及常用技术措施; 第 5 章生态边坡与边坡景观, 详细介绍了植被护坡景观的设计方法、方案确定和实施等; 第 6 章边坡工程监测, 着重介绍了边坡的变形、应力、地下水的监测方法; 第 7 章边坡灾害智能预测, 介绍了 GIS 支持下计算智能集成边坡灾变预测系统在边坡灾变预测中的应用。

本书可作为土木工程、水利工程、矿业工程、石油工程、地质工程、交通运输工程等专业的研究生教材或高年级本科生教材, 也可作为高等学校相关专业的教师, 科研院所和工程部门的科研人员、工程技术人员的技术参考书。

* * *

责任编辑: 王 跃 吉万旺
责任设计: 董建平
责任校对: 孟 楠 关 健

普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材
土木工程专业研究生系列教材

边坡工程学

重庆大学 张永兴 主编

*

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
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 25 字数: 608 千字
2008 年 8 月第一版 2008 年 8 月第一次印刷
印数: 1—3000 册 定价: 39.00 元

ISBN 978-7-112-09942-9

(16646)

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)

前 言

本书是在作者为岩土工程学科高年级本科生和研究生开设近 20 年的专业课程《边坡工程学》讲义及黄求顺教授的专著《边坡工程》的基础上编写的。

全书共 7 章。第 1 章绪论, 归纳了边坡破坏的主要形式及其影响因素, 介绍了边坡工程学的主要内容和研究方法; 第 2 章讲述了边坡稳定性的判别准则, 介绍了工程地质类比法、刚体极限平衡法、数值分析方法等边坡稳定性分析理论与分析实例; 第 3 章分析了边坡岩体的水力学特性及水对边坡的作用, 详细介绍了水平钻孔排水、专用排水隧道、排水孔幕、排水管网等排水处理方案及工程实例; 第 4 章介绍了边坡工程防治设计的基本原则, 分析了边坡防治常用措施及适用范围, 提出了边坡防治设计的程序及方案优化; 第 5 章通过借鉴国外植被护坡工程的先进技术和设计理念, 详细介绍了植被护坡景观的设计方法、方案确定和实施等; 第 6 章着重介绍了边坡的变形、应力、地下水的监测方法, 通过监测实例提供了边坡工程监测设计、实施及监测数据的整理与分析判断技术; 第 7 章将 GIS 技术与计算智能理论耦合并应用于边坡灾变研究, 介绍了 GIS 支持下计算智能集成边坡灾变预测系统在边坡灾变预测中的应用。

本书可作为土木工程、水利工程、矿业工程、石油工程、地质工程、交通运输工程等专业的研究生教材或高年级本科生教材, 也可作为高等学校相关专业的教师、科研院所和工程部门的科研人员、工程技术人员的技术参考书。

本书由重庆大学张永兴教授任主编, 吴曙光副教授任副主编。参加编写工作的还有阴可、刘新荣、王桂林、文海家、刘先珊、陈建功、许明、卢黎、谢强等。研究生陈云、芦勃、李昕、吴柳霖、齐磊磊、黄焱、董捷、徐洪、侯俊伟、傅晏、余雪祯、袁飞、李渊等参加了资料整理并清绘了插图。

本书得到了重庆大学教材建设基金资助。编写中参阅了大量相关文献资料, 在此向这些资料的作者表示感谢。

限于水平, 难免有欠妥之处, 敬请读者指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 边坡破坏及其影响因素	1
1.1.1 边坡的破坏类型	1
1.1.2 边坡稳定的影响因素	3
1.2 边坡工程学研究的历史沿革	4
1.2.1 边坡稳定性分析研究沿革	4
1.2.2 边坡支护研究沿革	6
1.3 边坡工程学研究的基本内容和研究方法	8
1.3.1 当前边坡工程研究的特点	8
1.3.2 边坡工程学研究的基本内容	9
1.3.3 边坡工程学的研究方法	11
第 2 章 边坡稳定性分析方法	12
2.1 边坡稳定性的判别	12
2.1.1 边坡稳定系数的定义	12
2.1.2 边坡设计(允许)安全系数	14
2.2 工程地质类比法	15
2.2.1 边坡稳定条件形态对比法	15
2.2.2 边坡失稳条件对比法	15
2.3 刚体极限平衡法	16
2.3.1 圆弧法稳定性分析——瑞典条分法	16
2.3.2 改进的条分法	19
2.3.3 平面滑动岩坡稳定性分析	25
2.3.4 双平面滑动岩坡稳定性分析	28
2.3.5 楔形滑动岩坡稳定性分析	29
2.3.6 倾倒破坏岩坡稳定性分析	30
2.4 考虑滑动面变形的边坡块体稳定性分析	33
2.4.1 研究假定	33
2.4.2 坐标系统及其基本未知量	33
2.4.3 基本公式	33
2.4.4 稳定系数定义及稳定性判定	36
2.4.5 非线性分析	37
2.4.6 块体稳定分析程序结构及其功能	39
2.5 边坡稳定性数值分析方法	41
2.5.1 边坡稳定性分析有限单元法(FEM)	41
2.5.2 快速拉格朗日法(FLAC法)	45

2.6	基于随机模拟的边坡稳定分析法	47
2.6.1	基本理论	47
2.6.2	伪随机数发生器	49
2.6.3	节理岩体边坡滑动面随机搜索基本原理	49
2.7	边坡稳定性分析实例	55
2.7.1	实例一——建筑地基边坡稳定性分析	55
2.7.2	实例二——建筑高切坡稳定性分析	61
2.7.3	实例三——建筑边坡地基稳定性分析	65
第3章	边坡岩体水力特性	69
3.1	边坡岩体中的水流定律	69
3.1.1	岩体裂隙的渗透特性	69
3.1.2	应力作用下岩体裂隙的渗透特性	71
3.2	岩质边坡水力学参数的确定	74
3.2.1	裂隙样本法	74
3.2.2	现场试验法	78
3.2.3	裂隙网络水力学方法	89
3.2.4	试验与反分析结合法	92
3.2.5	数值试验法	95
3.3	岩质边坡渗流分析	98
3.3.1	饱和—非饱和渗流分析的等效连续介质模型	98
3.3.2	饱和—非饱和渗流分析的裂隙网络模型	99
3.3.3	饱和—非饱和渗流分析的双重孔隙介质模型	106
3.4	岩质边坡渗流场与应力场耦合分析	110
3.4.1	岩质边坡渗流场与应力场分析特点	110
3.4.2	饱和渗流应力耦合分析	115
3.4.3	非饱和渗流应力耦合分析	119
3.5	岩质边坡中的排水方案	123
3.5.1	地下水对边坡的作用	123
3.5.2	排水形式	125
3.6	工程应用实例	130
3.6.1	锦屏左岸边坡泄洪雾化区边坡渗流分析	130
3.6.2	三峡船闸高边坡降雨过程的渗流场分析	138
3.6.3	层状岩体高边坡降雨过程的渗流场分析	140
3.7	总结	143
第4章	边坡工程防治技术	145
4.1	概述	145
4.1.1	边坡工程防治设计的基本原则	145
4.1.2	边坡防治常用措施及使用范围	149
4.1.3	边坡防治设计的程序及方案优化	155
4.2	坡率法与削坡减载设计	157
4.2.1	坡率法与削坡减载概述	157
4.2.2	坡率法的设计	158
4.2.3	削坡减载设计	160

4.3	注浆加固	160
4.3.1	注浆加固技术概述	160
4.3.2	注浆加固技术在边坡防治中的应用	164
4.3.3	边坡注浆加固设计	165
4.3.4	边坡注浆加固施工	167
4.4	锚杆或预应力锚索加固	171
4.4.1	概述	171
4.4.2	锚杆(索)的设计与计算	178
4.4.3	锚杆的构造设计	184
4.4.4	锚杆(索)的施工	185
4.4.5	锚杆(索)的试验与观测	188
4.4.6	锚杆加固实例	192
4.5	混凝土挡墙或支撑加固	192
4.5.1	混凝土挡墙加固	192
4.5.2	支撑加固	193
4.6	挡墙与锚杆相结合的加固	195
4.6.1	概述	195
4.6.2	锚杆挡土墙设计荷载及内力计算	196
4.6.3	锚杆挡土墙设计流程	198
4.6.4	锚杆挡土墙加固实例	198
4.7	边坡信息化设计与施工	200
4.7.1	边坡工程系统的概念	200
4.7.2	边坡工程系统性原则	201
4.7.3	边坡工程动态设计与信息化施工	202
4.8	边坡工程加固实例	205
4.8.1	工程概况	205
4.8.2	设计基本资料	206
4.8.3	设计方案	206
4.8.4	工程施工	207
4.8.5	效果及评述	208
第5章 生态边坡与边坡景观		209
5.1	概论	209
5.1.1	传统边坡加固及护坡技术	209
5.1.2	生态边坡及边坡景观的作用和意义	210
5.2	生态边坡	212
5.2.1	生态护坡技术及其发展	212
5.2.2	生态护坡与边坡稳定性的关系	216
5.2.3	生态护坡的力学效应	218
5.2.4	生态护坡的水文效应	224
5.2.5	生态护坡的其他效应	225
5.2.6	生态边坡工程技术要点	226
5.2.7	生态边坡的设计	231
5.3	边坡景观	233

5.3.1	边坡景观概述	233
5.3.2	边坡景观与生态边坡	237
5.3.3	生态边坡景观设计	240
5.3.4	生态边坡景观施工	248
5.4	生态边坡与边坡景观设计实例	250
5.4.1	重庆市石板坡长江大桥南桥头边坡工程	250
5.4.2	其他典型生态边坡和景观设计工程	256
第6章 边坡工程监测		259
6.1	概述	259
6.1.1	边坡工程监测的目的与意义	259
6.1.2	边坡工程监测的内容和方法	260
6.1.3	边坡监测项目的选定及仪器的选型	263
6.1.4	边坡监测技术要求	266
6.2	边坡的变形监测	267
6.2.1	地表大地变形量测	267
6.2.2	边坡表面裂缝量测	281
6.2.3	边坡岩体表面移动的观测	283
6.2.4	边坡深部位移和滑动面监测	284
6.2.5	边坡变形量测资料的处理与分析	290
6.3	边坡应力监测	292
6.3.1	边坡内部应力测试	293
6.3.2	岩石边坡地应力监测	294
6.3.3	边坡锚固应力测试	294
6.4	边坡地下水监测	297
6.4.1	地下水位监测	298
6.4.2	孔隙水压力监测	298
6.5	边坡监测实例	299
6.5.1	路堑边坡施工中的动态监测	299
6.5.2	TCA2003 全站仪在小湾水电站高边坡监测中的应用	303
6.5.3	常规仪器与 GPS 相结合的全自动化遥控边坡监测系统	307
6.5.4	基于监测数据的边坡位移可视化分析系统	313
第7章 边坡灾害智能预测		320
7.1	边坡灾变判据	320
7.1.1	边坡灾变判据的确定原则	320
7.1.2	已有边坡灾变判据归纳分析	320
7.1.3	综合信息模糊灾变判据及其特点	322
7.1.4	综合信息模糊灾变判据的具体表达	322
7.2	边坡灾变预测的系统设计	323
7.2.1	边坡灾变预测的神经网络系统设计	323
7.2.2	边坡灾变预测的模糊推理系统研究	327
7.2.3	边坡灾变预测的 ANFIS 系统研究	332
7.3	边坡灾变 GIS 综合信息模型	336
7.3.1	地理信息系统概述	336

第 1 章 绪 论

边坡按成因可分为自然边坡和人工边坡。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形成的边坡，其中挖方形成的边坡称为开方边坡，填方形成的称为构筑边坡，后者有时也称为坝坡。人工边坡的几何参数可以人为控制。

边坡按组成物质可分为岩质边坡（简称岩坡）和土质边坡（简称土坡）。岩坡失稳与土坡失稳的主要区别在于土坡中可能滑动面的位置并不明显，而岩坡中的滑动面则往往较为明确，无需像土坡那样通过大量试算才能确定。岩坡中结构面的规模、性质及其组合方式在很大程度上决定着岩坡失稳时的破坏形式；结构面的产状或性质稍有改变，岩坡的稳定性将会受到显著影响。因此，要正确解决岩坡稳定性问题，首先需搞清结构面的性质、作用、组合情况以及结构面的发育情况等，在此基础上不仅要作出破坏方式作出判断，而且对其破坏机制也必须进行分析，这是保证岩坡稳定性分析结果正确性的关键。

典型的边坡如图 1-1 所示。边坡与坡顶面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称为坡高。

边坡稳定问题是工程建设中经常遇到的问题，例如建筑的切坡、水库的岸坡、渠道边坡、隧洞进出口边坡、拱坝坝肩边坡以及公路或铁路的路堑边坡等，都涉及到稳定性问题。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。

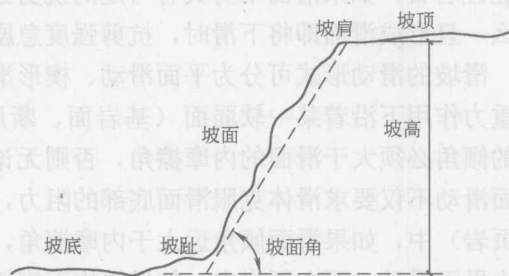


图 1-1 边坡示意图

1.1 边坡破坏及其影响因素

1.1.1 边坡的破坏类型

边坡的破坏类型从形态上可分为崩塌和滑坡。

产生崩塌破坏的一般是岩质边坡，是指块状岩体与岩坡分离，向前翻滚而下。其特点是，在崩塌过程中，岩体中无明显滑动面。崩塌一般发生在既高又陡的岩坡前缘地段，这时大块的岩体与岩坡分离而向前倾倒，如图 1-2 (a) 所示；或者，坡顶岩体由于某种原因脱落翻滚而在坡脚下堆积，如图 1-2 (b) 和 (c) 所示。崩塌经常发生在坡顶裂隙发育的地方。其起因是由于风化等原因减弱了节理面的黏聚力，或是由于雨水进入裂隙产生水

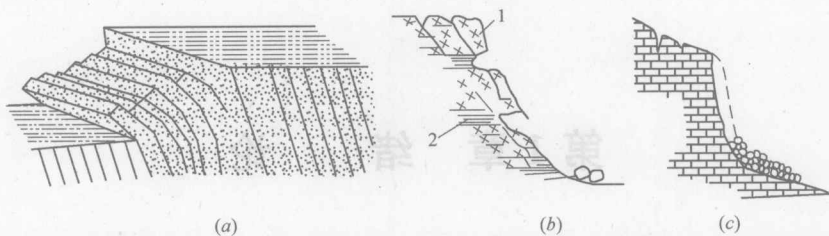


图 1-2 崩塌类型

(a) 倾倒破坏; (b) 软硬互成坡体的局部崩塌和坠落; (c) 崩塌破坏

1—砂岩; 2—页岩

压力所致, 或者也可能是由于气温变化、冻融松动岩石的结果, 或者是由于植物根系生长造成膨胀压力, 以及地震、雷击等原因而引起。自然界的巨型山崩, 总是与强烈地震或特大暴雨相伴生。

所谓滑坡是指岩土体在重力作用下, 沿坡内软弱面产生的整体滑动。与崩塌相比, 滑坡通常以深层破坏形式出现, 其滑动面往往深入坡体内部, 甚至延伸到坡脚以下, 其滑动速度虽比崩塌缓慢, 但不同的滑坡其滑速可以相差很大, 这主要取决于滑动面本身的物理力学性质。当滑动面通过塑性较强的岩土体时, 其滑速一般比较缓慢; 相反, 当滑动面通过脆性岩石, 如果滑面本身具有一定的抗剪强度, 在构成滑面之前可承受较高的下滑力, 那么一旦形成滑面即将下滑时, 抗剪强度急剧下降, 滑动往往是突发而迅速的。

滑坡的滑动形式可分为平面滑动、楔形滑动以及旋转滑动。平面滑动是一部分岩土体在重力作用下沿着某一软弱面(基岩面、断层、裂隙)的滑动, 如图 1-3 (a) 所示。滑面的倾角必须大于滑面的内摩擦角, 否则无论坡角和坡高的大小如何, 边坡都不会滑动。平面滑动不仅要求滑体克服滑面底部的阻力, 而且还要克服滑面两侧的阻力。在软岩(例如页岩)中, 如果滑面倾角远大于内摩擦角, 则岩石本身的破坏即可解除侧边约束, 从而产生平面滑动。而在硬岩中, 如果结构面横切到坡顶, 解除了两侧约束时, 才可能发生平面滑动。当两个软弱面相交, 切割岩体形成四面体时, 就可能出现楔形滑动(图 1-3b)。如果两个结构面的交线因开挖而处于出露状态, 不需要地形上或结构上的解除约束即可能产生滑动。法国 Malpasset 坝的崩溃(1656 年)就是岩基楔形滑动的结果。旋转滑动的滑面通常呈弧形, 如图 1-3 (c), 这种滑动一般产生于非成层的均质岩土体中。

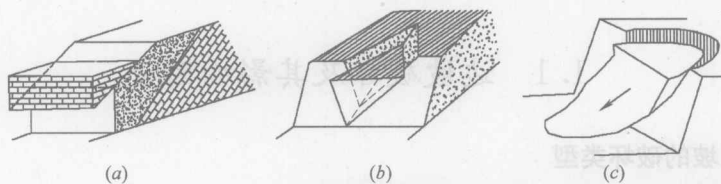


图 1-3 滑坡类型

(a) 平面破坏; (b) 楔形破坏; (c) 旋转滑动

边坡实际的破坏形式是很复杂的, 除上述两种主要破坏形式外, 还有介于崩塌与滑坡之间的滑塌, 以及倾倒、剥落、流动等破坏方式; 有时也可能出现以某种破坏方式为主, 兼有其他若干破坏形式的综合破坏。

边坡的滑动过程有长有短，有快有慢，一般可分为三个阶段。初期是蠕动变形阶段，这一阶段中坡面和坡顶出现张裂缝并逐渐加长和加宽；滑坡前缘有时出现挤出现象，地下水位发生变化，有时会发出响声。第二阶段是滑动破坏阶段，此时滑坡后缘迅速下陷，岩土体以极大的速度向下滑动。这一阶段往往造成巨大的危害。最后是逐渐稳定阶段，这一阶段中，疏松的滑体逐渐压密，滑体上的草木逐渐生长，地下水渗出由浑变清等。

1.1.2 边坡稳定的影响因素

1. 结构面在边坡破坏中的作用

许多边坡在陡坡角和几百米高的条件下是稳定的，而许多平缓边坡仅高几十米就破坏了。这种差异是因为边坡的稳定性是随组成边坡的岩体中结构面（诸如断层、节理、层面等）的倾角而变化的。如果这些结构面是直立的或水平的，就不会发生单纯的滑动，此时的边坡破坏将包括完整岩块的破坏以及沿某些结构面的滑动。另一方面，如果岩体所含的结构面倾向于坡面，倾角又在 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 之间，就会发生简单的滑动。

因此，边坡变形与破坏的首要原因，在于坡体中存在各种形式的结构面。岩体的结构特征对边坡应力场的影响主要表现为由于岩土体的不均一和不连续性，使沿结构面周边出现应力集中和应力阻滞现象。因此，它构成了边坡变形与破坏的控制性条件，从而形成不同类型的变形与破坏机制。

边坡结构面周边应力集中的形式主要取决于结构面的产状与主压应力的关系。结构面与主压应力平行，将在结构面端点部位或应力阻滞部位出现拉应力和剪应力集中，从而形成向结构面两侧发展的张裂缝。结构面与主压应力垂直，将发生平行结构面方向的拉应力，或在端点部位出现垂直于结构面的压应力，有利于结构面压密和坡体稳定。结构面与主压应力斜交，结构面周边主要为剪应力集中，并于端点附近或应力阻滞部位出现拉应力。顺坡结构面与主压应力成 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 夹角，将出现最大剪应力与拉应力值，对边坡稳定十分不利，坡体易于沿结构面发生剪切滑移，同时可能出现折线型蠕滑裂隙系统。结构面相互交汇或转折处，形成很高的压应力及拉应力集中区，其变形与破坏常较为剧烈。

2. 边坡外形改变对边坡稳定性的影响

河流、水库及湖海的冲刷及淘刷，使岸坡外形发生变化。当侵蚀揭露坡体底部的软弱结构面，使坡体处于临空状态，或侵蚀揭露坡体下伏软弱层的顶面时，使坡体失去平衡，最后导致破坏。

人工削坡时未考虑岩体结构特点，切露了控制斜坡稳定的主要软弱结构面，形成或扩大了临空面，使坡体失去支撑，会导致斜坡的变形与破坏。施工顺序不当，坡顶开挖进度慢而坡脚开挖速度快，加陡斜坡或形成倒坡。坡角增加时，坡顶及坡面张力带范围扩大，坡脚应力集中带的最大剪应力也随之增大。坡顶、坡脚应力集中增大，会导致斜坡的变形与破坏。

3. 岩土体力学性质的改变对边坡稳定性的影响

风化作用使坡体强度减小，坡体稳定性大大降低，加剧了斜坡的变形与破坏。坡体岩土风化越深，斜坡稳定性越差，稳定坡角越小。

边坡的变形与破坏大都发生在雨期或雨后，还有部分发生在水库蓄水和渠道放水之后，有的则发生在施工排水不当的情况下。这些都表明水对斜坡稳定性的影响是显著的。当斜坡岩土体亲水性较强或有易溶矿物成分时，如含易溶盐类的黏土质页岩、钙质页岩、

凝灰质页岩、泥灰岩或断层角砾岩等，浸水易软化、泥化或崩解，导致边坡变形与破坏。因此，水的浸润作用对斜坡的危害性大而普遍。

4. 各种外力直接作用对边坡稳定性的影响

区域构造应力的变化、地震、爆破、地下静水压力和动水压力，以及施工荷载等，都使斜坡直接受力，对斜坡稳定的影响直接而迅速。

边坡处于一定历史条件下的地应力环境中，特别是在新构造运动强烈的地区，往往存在较大的水平构造残余应力。因而这些地区边坡岩体的临空面附近常常形成应力集中，主要表现为加剧应力差异分布。这在坡脚、坡面及坡顶张力带表现得最明显。研究表明，水平构造残余应力愈大，其影响愈大，二者成正比关系。与自重应力状态下相比，边坡变形与破坏的范围增大，程度加剧。

由于雨水渗入，河水水位上涨或水库蓄水等原因，地下水位抬高，使斜坡不透水的结构面上受到静水压力作用，它垂直于结构面而作用在坡体上，削弱了该面上所受滑体重量产生的法向应力，从而降低了抗滑阻力。坡体内有动水压力存在，会增加沿渗流方向的推滑力，当水库水位迅速回落时尤甚。

地震引起坡体振动，等于坡体承受一种附加荷载。它使坡体受到反复振动冲击，使坡体软弱面咬合松动，抗剪强度降低或完全失去结构强度，斜坡稳定性下降甚至失稳。地震对斜坡破坏的影响程度，取决于地震强度大小，并与斜坡的岩性、层理、断裂的分布和密度以及坡面的方位和岩土体的含水性有关。

由上述可见，应根据岩土体的结构特点、水文地质条件、地形地貌特征，并结合区域地质发育史，分析各种营力因素的作用性质及其变化过程，来论证边坡的稳定性。

1.2 边坡工程学研究的历史沿革

边坡工程是工程建设过程中一个古老而常新的问题，边坡失稳引起的滑坡、崩塌灾害往往带来巨大的生命和财产损失。因此，国际上将滑坡（崩塌）、泥石流和火山、地震并列为全球性地质灾害。边坡工程学是研究各种不同类型边坡的稳定性及其有效防治技术的科学。可以说，自从人类生存在地球，依山傍水充分利用地形使自己能够安全舒适地生活就是人们的目标。随着物质文明的提高和科技的进步，对边坡的应用和研究也就越充分和完善。

1.2.1 边坡稳定性分析研究沿革

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，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，取得了可贵的经验和成果。边坡稳定性分析、评价与计算的研究是从土质滑坡开始，由法国工程师库仑（Collin A., 1846）首次介绍圆弧形滑动面，并用剪切试验数据分析滑坡的稳定性。后来，费林纽斯（Fellen HiusW, 1927）提出著名的摩擦圆法，成功地应用简单不排水剪切试验的数据，预测边坡稳定性。太沙基（Terzaghi K, 1936）引入孔隙水压力的概念，提

出有效应力分析法；Morgenstern N. R. 和 Price V E. (1965) 提出著名的摩尔根—柏莱斯法；Sarma S. K (1979) 提出著名的 Sarma 法，该法克服以往方法只能垂直条分的局限，可以任意条分。

我国对边坡稳定性问题广泛研究，始于 20 世纪中叶，主要与国家的经济发展和工程建设的需要息息相关，边坡稳定性研究多见于铁路工程、水利水电工程和矿山工程等国家急需建设的工程中。

边坡的稳定分析一直是学者研究的一个热点问题，众多学者除了对传统的极限平衡方法改进外，还提出了许多新的分析方法。目前，边坡稳定性评价虽然方法很多，但归结起来主要有六类：

(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有有限单元法、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。

从上可见，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本身都有它的适应性和局限性，因而加剧了新技术、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三个方面：

- (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

方法是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。近年来,研究人员逐渐认识到在边坡稳定性分析中考虑其不确定性的重要性和必要性,形成了新的观念和不确定性思维方式,使边坡稳定性分析的研究和发展达到了一个新的高度。

当前,边坡稳定性分析中的不确定性研究已经成为边坡稳定性研究的热点之一。通过一些新的学科和理论的引入与交叉,逐步形成了一些新的边坡稳定性分析方法,如以概率论与数理统计为基础的可靠性分析方法、以模糊数学为基础的模糊综合评价方法、以灰色系统理论为基础的灰色系统评价方法、以及以神经网络理论为基础的神经网络评价方法等等。这些评价方法在边坡稳定性分析与评价中均取得了比较好的应用成果,推动了边坡稳定性研究的发展。

然而,正如前所述,对于边坡稳定性分析与评价这样一个如此复杂多变的问题,上述理论在实际应用中还是显示出了不少缺陷和不足,如可靠性分析方法中的可靠指标数学推导过于复杂,边坡稳定性的系统可靠性求解在边坡破坏机制不清楚的情形下几乎无法获得;模糊综合评价方法中如何从有限的工程地质数据中探寻边坡稳定性影响因素的合理隶属函数与权重分配,以尽量减少边坡稳定性分析中的主观人为因素;灰色系统评价方法中面临同样的问题;神经网络评价方法存在推理过程不清楚、网络训练时间长等缺陷。克服这些困难是研究人员今后的努力方向,同时,也要寻求新的理论和方法,从新的角度研究边坡的稳定性问题。

1.2.2 边坡支护研究沿革

正是由于边坡产生滑坡崩塌这类地质灾害的极大危害性,因此有关边坡的防治研究一直为世人所关注。经过多年的工程实践和理论研究,国内外对边坡崩塌的防治技术渐趋成熟,在边坡滑坡防治的各个方面也取得了很大成就,其中支挡抗滑结构的发展应用尤为迅速,抗滑桩作为一种支挡抗滑结构物而广泛应用于边坡滑坡的稳定性治理中。抗滑桩这种新型支挡结构,由于具有施工方便、速度快、工程量少和投资少等优点,因而发展较快。国内抗滑桩较多地应用于铁路、公路建设中滑坡治理,并取得了良好的效果。

欧美国家从19世纪中叶就开始了对于滑坡灾害防治的研究,但是早期由于人们对滑坡的性质和变化规律认识不深,对那些大、中型滑坡只能绕避,只对小型滑坡采取刷方减载、反压以及抗滑挡土墙治理的措施,排水工程更是优先考虑。直到第二次世界大战后随着各国经济的发展和国土开发利用,遇到的滑坡越来越多,用人为支挡工程治理大量滑坡才真正开始,50年来有了较大的发展和提高,一些大型滑坡也采用支挡工程来治理。支挡工程的发展大体可分为三个阶段:

(1) 20世纪50年代以前,治理滑坡以地表和地下排水工程为主,抗滑支挡工程主要是挡土墙。

(2) 20世纪60~70年代,在以应用排水工程和抗滑挡土墙为主的同时,大力开发应用抗滑桩工程以解决抗滑挡土墙施工中的困难。欧美国家和前苏联多用钻孔钢筋混凝土灌注桩,直径1.0~1.5m、深20~30m;日本则多用钻孔钢管桩,钻孔直径400~550mm、深20~30m,孔中放入直径318.5~457.2mm、壁厚10~40mm的钢管,钢管内外灌入混

凝土或水泥砂浆，为增加桩的受剪承载力，有时在钢管中再放入 H 型钢。桩间距一般为 1.5~4.0m，而以 2.0~2.5m 居多，为了增加桩的抗弯能力和群桩受力，国外常将两排或三排桩顶用承台连接，形成刚架受力。也有少数用打入桩的。20 世纪 70 年代后期，在日本开始应用直径 1.5~3.5m 的挖孔抗滑桩。

(3) 20 世纪 80 年代以来，在小直径抗滑桩应用的同时，为治理大型滑坡，大直径挖孔抗滑桩开始使用。如日本在大阪府的龟之瀨滑坡上采用直径 5m、深 50~60m 的大型抗滑桩。它是周围均匀布筋，只在滑动面附近用型钢加强。与此同时，抗滑支挡结构的另一个特点是锚索工程在滑坡防治中大量使用，或与抗滑桩联合使用，或锚索单独使用（加反力梁或锚墩）。由于锚索工程不开挖滑体，又能机械化施工，比抗滑桩工程节省投资 50%，所以目前被广泛应用。

我国对滑坡灾害的系统研究和治理是 20 世纪 50 年代开始的。根据我国国情研究开发了一系列有效的防治办法，总结出绕避、排水、支挡、减重、反压等治理滑坡的原则和方法，其中尤以铁路部门遇到和治理的滑坡最多。我国对抗滑支挡建筑物的研究和开发应用起步虽较国外晚，但由于建设中治理滑坡的需要，其发展过程基本上与国外同步，也分为三个阶段：

(1) 20 世纪 50 年代起，主要学习前苏联的经验，在治理滑坡中首先考虑地表和地下排水工程，如地面截、排水沟，地下截水盲沟、盲洞，支撑渗沟等，辅以减重、反压和支挡工程。支挡工程主要是各种形式的挡土墙。用重力式抗滑挡土墙治理大型滑坡常常工程浩大，施工困难，虽然总结了“分段跳槽开挖基坑”的施工经验，有时还会造成滑坡加速滑动，危及施工安全。

(2) 20 世纪 60~70 年代，曾成功地应用支撑盲沟加小抗滑挡墙取得疏水和支挡滑坡的双重效果，但深盲沟施工开挖也相当困难，因为地下水发育，施工开挖极易坍塌。为了解决抗滑挡土墙开挖基础的困难，曾在贵昆线二梯岩滑坡治理中设计采用沉井式抗滑挡土墙，但施工也不容易。20 世纪 60 年代中期，在成昆线建设中，研究设计用大截面挖孔钢筋（钢轨）混凝土抗滑桩成功，由于它抗滑能力大，破坏滑坡体稳定小，施工方便，很快在铁路内、外滑坡治理中被广泛应用，在治理大、中型滑坡中几乎取代了抗滑挡土墙。例如 1981 年宝成铁路水害抢修中略阳至广元段的 20 个滑坡治理中有 14 个采用了抗滑桩，占 70%。抗滑桩被喻为治理滑坡的“重型武器”，使治理大型滑坡有了可能。20 世纪 70 年代中后期，在深入研究抗滑桩的受力状态和设计理论的同时，又研究开发了排架桩、刚架桩、椅式桩墙等新的结构形式，改变了抗滑桩的受力状态，节省工和钢材，但由于施工要求高于单桩，至今应用不广。

(3) 20 世纪 80 年代以来，随着锚索技术的发展，在滑坡防治中开始大量地采用锚索工程。由于锚索系用高强度钢丝束锚固于滑体以下的滑床中，抗拉力大，预应力锚索变一般支挡结构物的被动受力为主动受力，对滑体扰动小，又是机械化施工，所以应用前景广阔。目前锚索的应用有两种情况：

1) 锚索与抗滑桩联合形成“锚索抗滑桩”。在抗滑桩的顶部加 2~4 束锚索，增加一个拉力，改变了原普通抗滑桩的悬臂受力状态，接近简支梁结构受力，使桩的被动受力为主动受力，因而大大减小了抗滑桩的截面和埋置深度。

2) 用锚索单独稳定滑坡。即在滑坡体上设置若干排锚索，锚固于滑动面以下的稳定

地层中，地面采用梁（包括框架梁）或锚墩作反力装置给滑体施加预应力来稳定滑坡。在滑坡的综合整治过程中，还会将预应力锚索单独加固与锚索抗滑桩（或普通抗滑桩）联合使用，用于不同的治理部位从而达到整体加固的目的。

目前，边坡支护仍然是国内外学者研究的热点之一，并且已经做过大量的探讨和研究工作，但主要是在推力计算、可能出现的滑动面的搜索、滑坡的稳定性评价、滑坡的失稳模式及其影响因素、滑坡预报问题等方面，对抗滑挡墙、抗滑桩和预应力锚索（杆）抗滑桩等抗滑措施仍在不断研究和完善之中。

但是，鉴于工程地质发展水平及治理经验的不足，在滑坡稳定性评价及治理措施上，有许多问题尚待解决。如有的工程技术人员因稳定性评价或计算方法不合理及力学参数选择不当，使本不该治理或仅需简单地加固措施就能保持稳定的边坡，采取了过于保守的加固措施，得到了“感冒动手术”式的花费太高的工程加固；有的因对地质原型认识不清或方案选择失误，造成了滑坡治理失败。更值得提出的是：在治理方案上，很多人没有进行方案比较、方案论证、方案优化，治理方案不是最优方案，造成了很大的不必要的浪费。对这些问题应引起足够重视。应大力提倡优化分析、开展信息化施工、进行动态设计、设计反馈，开发新的加固措施与施工技术，把滑坡工程治理提高到一个新的高度。

如何在多种可行方案中选择一种既能达到安全要求，又能满足经济性和环保要求的治理方案，这就是边坡治理措施的优化问题。现代高速计算机在各学科领域的广泛应用和现代优化算法的不断发展，使得最优化技术在工程中的应用也获得迅速发展。根据工程的具体情况，在计算机上进行人机交互或自动搜索方式的半自动或自动分析，对各种可行性方案进行优化，最终选择一种最为合理、经济的治理措施方案，缩短周期，提高效率，节约工程费用，是边坡治理研究工作的趋势。

1.3 边坡工程学研究的基本内容和研究方法

1.3.1 当前边坡工程研究的特点

1. 充分利用边坡自身的承载能力

组成边坡的岩土体本身就是可以利用和依靠的资源，是天然建筑材料。但是，组成边坡的土体一般自身强度不高，即使岩体也由于结构面的切割而呈现不均质和各向异性，客观条件十分复杂。因此，要在这类岩土体上建成边坡工程，必须适应当地的岩土体条件，充分利用岩土体自身的承载能力，通过各种有效的手段，使这些不均质的岩体或土体成为完整的结构。这是我们岩土工程科技人员的基本任务。

2. 先进设备、仪器、工具的广泛应用

由于现代施工技术的发展，电子计算机的广泛应用以及先进施工机具和试验测试仪器的不断完善，使人们有条件对极其复杂的岩土工程问题进行研究、分析和具体工程处理。为了完成工程任务，必须善于充分利用这些先进的手段。

3. 全面研究即系统工程研究

边坡工程研究涉及较多专业，如地质学、力学、工程学等，需要深入研究它们之间的内在联系。单学科的研究是必要的基础条件，但是还需要将众多单学科结合起来这个充分条件。只有在这样的必要条件和充分条件均具备的情况下边坡工程问题研究才能落到实