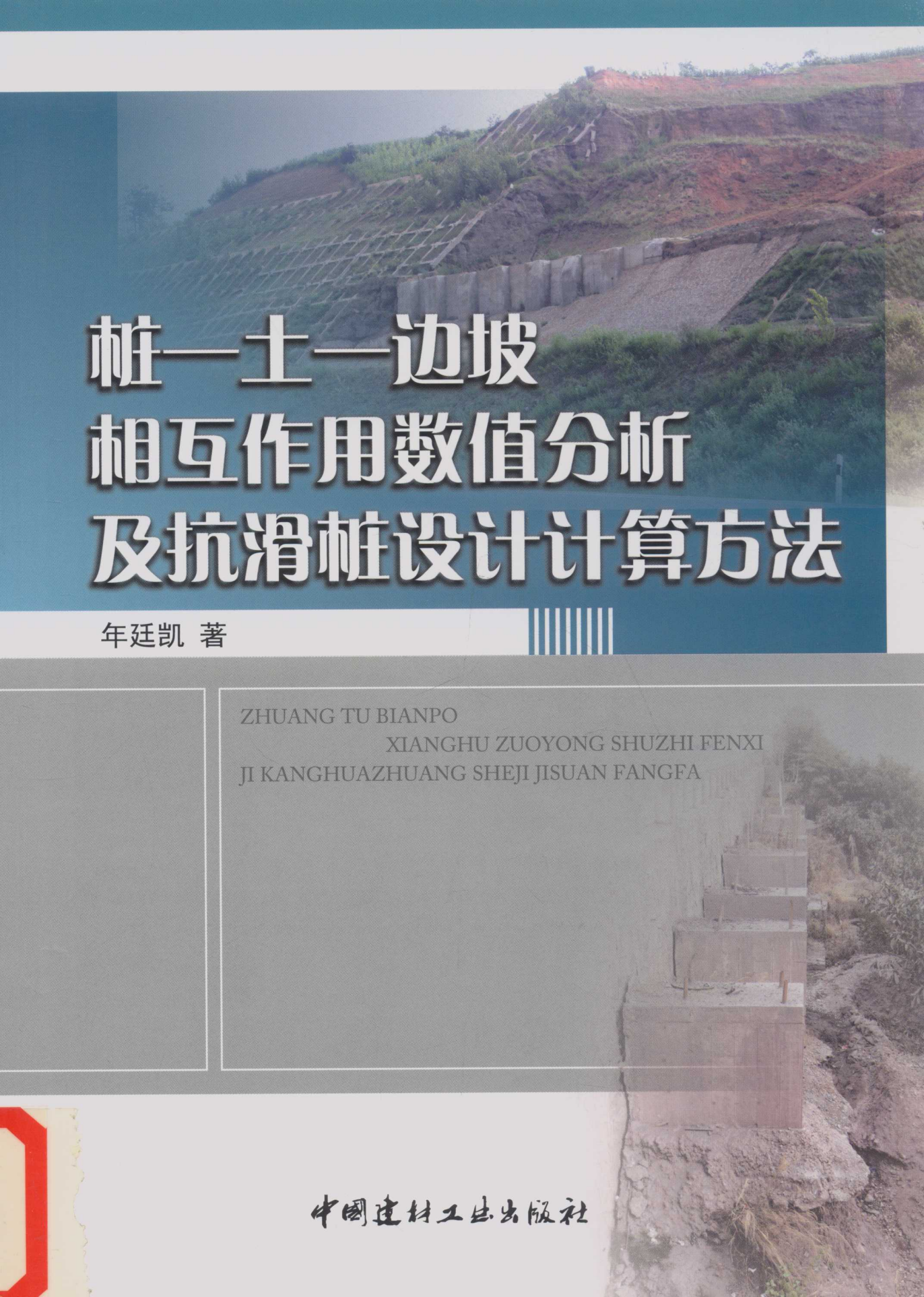




桩—土—边坡 相互作用数值分析 及抗滑桩设计计算方法

年廷凯 著

ZHUANG TU BIANPO
XIANGHU ZUOYONG SHUZHI FENXI
JI KANGHUAZHUANG SHEJI JISUAN FANGFA



中国建材工业出版社

第1章 荷载 作用效应分析 及结构截面设计计算方法

张永海 编

中国水利水电出版社

桩—土—边坡相互作用数值分析 及抗滑桩设计计算方法

年廷凯 著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

桩—土—边坡相互作用数值分析及抗滑桩设计计算方法 / 年廷凯著. —北京: 中国建材工业出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-5160-1012-9

I. ①桩… II. ①年… III. ①抗滑桩—设计 IV. ①TU753.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 248383 号

内 容 简 介

本书基于三维有限元强度折减法和极限分析强度折减法, 对抗滑桩—土 (岩)—边坡 (滑坡) 工程中存在的一般性、共性问题和关键性科学问题进行了系统全面的阐述, 重点研究了抗滑桩加固边坡的三维土拱效应与荷载传递机理及桩基优化设计与解耦分析方法, 包括确定临界滑动面 (剪切滑动带), 提出合理桩间距、桩径比及多排桩条件下的最佳布桩形式, 探讨坡顶超载、边坡转角等特殊工况下的抗滑桩优化布置, 剖析复杂环境下滑坡推力及荷载传递过程与土拱效应, 推导桩侧有效土压力解析式及锚固深度检算公式, 建议桩基性能优化设计准则及发展抗滑桩—边坡相互作用的解耦分析方法和工程实用设计方法。这些内容不仅能促进抗滑桩加固边坡 (滑坡) 的学术理论发展, 而且可以指导工程建设实践。

本书可供从事岩土工程、地质工程、水利工程、交通工程、铁道工程等领域的科研技术人员和高校师生参考使用, 亦可供勘察、设计、施工人员及从事抗滑桩基材料研发和生产的企业人员参考。

桩—土—边坡相互作用数值分析及抗滑桩设计计算方法

年廷凯 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 10.75

字 数: 280 千字

版 次: 2014 年 10 月第 1 版

印 次: 2014 年 10 月第 1 次

定 价: 68.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn 微信公众号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

边坡稳定性评价与滑坡防治技术，一直是学术界和工程界的热点问题。抗滑桩作为一种有效的工程措施，在边坡加固工程、滑坡地质灾害防治中得到了广泛应用，并受到业内人士的普遍关注。然而由于问题的复杂性，关于抗滑桩加固边坡的工作机理、桩—土相互作用规律仍没有彻底解决，抗滑桩设计理论与计算方法目前还处于半经验半理论的不成熟阶段，落后于工程实践，因此亟需开展深入而系统的理论分析与数值计算等方面的研究，发展与完善相应的抗滑桩工程实用设计方法；特别是针对复杂荷载和地质环境及特殊工况下的抗滑桩—边坡相互作用问题，其稳定性分析理论与桩基设计方法仍无显著进展，更无统一国家规范可依。

为深刻揭示抗滑桩—岩土介质—边坡相互作用机制，获得合理的抗滑桩—边坡体系的稳定性安全系数、临界滑动面和土拱演化形式及荷载传递规律，发展抗滑桩优化设计与实用分析方法，本书基于有限元强度折减法和极限分析强度折减法，结合典型算例边坡和滑坡工程实例，对抗滑桩加固边坡工程中存在的一般性、共性问题 and 关键性科学问题开展了深入细致的研究，研究重点在抗滑桩加固边坡的三维土拱效应与荷载传递机理及桩基优化设计与解耦分析方法，包括确定临界滑动面（剪切滑动带），提出合理桩间距、桩径比及布桩形式，剖析荷载传递过程与土拱效应，给出桩侧有效土压力解析式，建议桩基性能优化设计准则及发展抗滑桩—边坡相互作用的解耦分析方法和工程实用设计方法。通过以上几个方面的综合研究，全面揭示抗滑桩—土（岩）相互作用机制及滑坡加固机理，为边坡工程防护和滑坡治理提供技术支持。

本书共分8章，第1章介绍抗滑桩加固边坡的国内外研究现状与发展趋势，并指出存在的主要问题；在此基础上，介绍本书的主要研究内容。

第2章介绍基于强度折减技术的弹塑性有限元法的基本理论与数值实施及桩—土—边坡体系三维数值分析中的失稳判据问题，并结合典型边坡算例对程序进行了验证分析。

第3章介绍了抗滑桩加固边坡的三维数值分析方法在Abaqus中的实现过程，并结合典型算例深入探讨了计算模型尺度、材料参数、最佳桩位、合理桩间距和桩径比及桩头约束等关键问题；在此基础上，结合实际滑坡案例开展了初步应用研究。

第4章开展了不同几何形状与截面尺寸的抗滑桩加固边坡的三维数值分析，针对单排桩、双排桩、等效错列布桩、等间距错列布桩等四种布桩形式，考虑桩头自由和约束两种条件，探讨了抗滑桩—边坡体系的安全系数与桩身内力分布及最佳布桩形式；考虑坡顶超载、边坡转角等特殊工况，开展了不同超载强度和超载位置下三维凹坡和凸坡的整体稳定性及抗滑桩优化布置问题。

第5章介绍了桩—土—边坡相互作用分析中的三维土拱效应与荷载传递机理，深入探讨了桩间距、桩径比、截面形状、布桩形式、坡顶超载、边坡转角等因素对土拱效应及桩基工

作性状的影响。

第6章引入强度折减技术,发展基于上限定理的抗滑桩侧向有效土压力极限分析强度折减法,讨论了非均质与各向异性土体、考虑孔隙水压力和地震效应的抗滑桩侧向土压力及最优桩位问题。

第7章基于极限分析下限方法,提出了考虑斜坡效应、黏聚力、坡面超载和地震效应的桩周地层容许承载力解析式,建议了滑动面上下两层土体时桩周地层容许承载力的修正公式;进而结合桩周地层强度控制论,检算了抗滑桩的最佳锚固深度问题。

第8章基于获得的桩侧无量纲极限有效土压力,对于抗滑桩挠曲微分方程建立了以有限差分为基础的数值解法,进而发展了抗滑桩简化设计方法;将桩基设计方法与抗滑桩加固边坡稳定性数值分析方法、抗滑桩锚固深度检验性核算方法相结合,建立了抗滑桩—土(岩)一边坡相互作用的解耦分析方法和工程实用设计方法;在此基础上,将该方法应用于某港区车场边坡治理工程的抗滑桩设计。

在本书稿完成之际,作者忆起栾茂田教授在作者科研成长道路上所给予的引路、指导和无私帮助,在此表示由衷的感激;感谢所在的大连理工大学岩土工程研究所各位同仁给予的关心和帮助,也特别感谢杨庆教授一直以来对作者工作和科研上的大力支持。感谢国际地质灾害与减灾协会、中国地震局工程力学研究所、辽宁水文地质工程地质勘察院有关专家在滑坡野外调查及稳定性评价方面给予的支持;感谢课题组研究生夏永成、刘枫、鲁志杰、万少石、刘成、张克利、徐海洋、余鹏程、李东晨、刘博、张彦君、刘凯等在相关专题研究中做出的贡献;本书主要内容是在作者博士论文和指导的研究生徐海洋、李东晨、夏永成等硕士论文基础上发展起来的,部分成果尚未公开发表过;在本书撰写过程中,博士生张彦君、硕士生刘凯等提供了许多帮助,在此表示衷心的感谢!本书能够顺利出版,还要感谢国家自然科学基金(No. 51179026, No. 41172293)和国家重点实验室基金(No. SKLGP2010K005, SKLGDUEK1307)的部分资助,也特别感谢中国建材工业出版社的领导和责任编辑的大力支持。

抗滑桩一边(滑)坡课题,实质是滑坡问题与结构问题交织在一起,错综复杂;特别是桩—土相互作用问题,受岩土性状、环境荷载及基桩结构的影响,短期内尚难完全弄清楚,其设计理论和计算方法离实际仍有一定差距。因此,进行系统性的深入探索研究,仍是一项富有挑战性的工作。作者希望本书能对从事边(滑)坡稳定性评价与抗滑桩治理的广大设计、施工人员及科研、教学人员和研究生有所帮助。鉴于桩—土间相互作用问题还在不断发展、完善阶段,有一些理论和认识还有争议,一些方法还不成熟,加上著者水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请专家和读者批评指正。对于书中所引用文献的众多作者(列出的和未列出的)表示诚挚的谢意!

作 者

2014年9月于大连

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势	4
1.2.1 理论研究	6
1.2.2 数值模拟	7
1.2.3 试验研究	9
1.2.4 土拱研究	10
1.2.5 抗滑桩与滑坡体相互作用分析	12
1.2.6 抗滑桩一边坡稳定性分析方法	14
1.3 存在的主要问题及需要解决的关键技术问题	16
1.3.1 存在的主要问题	16
1.3.2 需要解决的关键技术问题	17
1.4 本书的主要内容	18
第2章 基于强度折减技术的有限元分析方法	20
2.1 有限元基本方程	20
2.2 有限元分析及本构模型	22
2.2.1 有限元软件 ABAQUS	22
2.2.2 一般意义上的 M-C 模型	23
2.2.3 ABAQUS 中的 M-C 模型	25
2.2.4 材料非线性的求解方法	27
2.3 基于强度折减技术的有限元法	28
2.3.1 强度折减技术	28
2.3.2 强度折减法的数值实现	29
2.3.3 算例验证与对比分析	31
2.4 小结	36
第3章 桩—土—边坡体系的三维有限元数值分析	37
3.1 引言	37
3.2 抗滑桩加固边坡的强度折减弹塑性有限元方法	38
3.2.1 地应力平衡	38
3.2.2 接触模型	39
3.2.3 接触算法	40
3.2.4 考虑接触特性的强度折减弹塑性有限元法数值实施	41

3.3 抗滑桩加固边坡的一般问题分析	42
3.3.1 模型尺寸与材料参数	42
3.3.2 抗滑桩一边坡计算模型尺度	43
3.3.3 最佳桩位讨论	46
3.3.4 合理桩间距、桩径比与桩长问题	47
3.3.5 桩头约束效应	50
3.4 工程实例分析	56
3.4.1 滑坡工程概况	56
3.4.2 计算模型与材料参数	56
3.4.3 计算结果及其分析	58
3.5 小结	60
第4章 抗滑桩设计及特殊工况下加固效应分析	62
4.1 引言	62
4.2 抗滑桩不同横截面形式设计	62
4.2.1 模型尺寸和材料参数	62
4.2.2 计算结果与对比分析	65
4.3 布桩形式	68
4.4 坡顶超载作用下抗滑桩加固效应分析	73
4.4.1 计算模型与材料参数	73
4.4.2 加载依据	73
4.4.3 考虑坡顶超载强度的数值分析	74
4.4.4 考虑坡顶超载位置的数值分析	76
4.5 转角边坡中抗滑桩加固效应分析	78
4.5.1 计算模型与材料参数	78
4.5.2 计算结果及其分析	80
4.6 小结	85
4.6.1 桩身截面形式对桩身内力的影响	85
4.6.2 布桩形式对桩身内力以及加固边坡安全系数的影响	85
4.6.3 坡顶荷载作用参数对桩身内力以及加固边坡安全系数的影响	86
4.6.4 抗滑桩加固特殊形状边坡的数值研究	87
第5章 桩—土—边坡相互作用及桩间土拱效应研究	88
5.1 引言	88
5.2 土拱效应影响因素分析	88
5.2.1 不同桩间距和桩径比时的土拱效应	88
5.2.2 不同横截面形式下桩间土拱效应	91
5.2.3 不同布桩形式下的土拱效应	91
5.2.4 坡顶超载条件下的土拱效应	94
5.2.5 边坡转角对桩间土拱效应的影响	95

5.3 小结..... 96

第6章 基于强度折减的抗滑桩加固边坡上限方法 98

6.1 引言..... 98

6.2 边坡加固中抗滑桩侧向土压力的上限解法..... 98

6.2.1 桩侧有效土压力分布模式..... 98

6.2.2 桩侧有效土压力上限解法..... 99

6.2.3 设桩后有效滑坡推力及临界状态 100

6.2.4 抗滑桩最优桩位分析 101

6.2.5 加桩后临界滑动面变化规律 103

6.2.6 桩侧加固力影响因素分析 103

6.3 非均质性与各向异性边坡中桩侧有效土压力问题 104

6.3.1 土的非均质性与各向异性特性 105

6.3.2 考虑非均质与各向异性效应的边坡稳定上限解法 107

6.3.3 桩侧有效土压力的理论分析与算例验证 110

6.3.4 非均质性与各向异性对桩侧有效土压力的影响分析 110

6.4 考虑孔隙水压力效应的桩侧有效土压力问题 112

6.4.1 考虑孔隙水压力效应的边坡稳定性上限解法 112

6.4.2 考虑坡体内孔隙水压力的桩侧土压力理论分析 115

6.4.3 孔隙水压力对桩侧有效土压力的影响分析 116

6.5 考虑地震效应的桩侧有效土压力问题 117

6.5.1 考虑地震荷载的边坡上限解法及算例验证 117

6.5.2 考虑地震荷载的桩侧土压力上限解法 120

6.5.3 水平地震加速度对抗滑桩加固效应的影响分析 120

6.6 小结 121

第7章 基于下限方法的抗滑桩锚固深度检算..... 122

7.1 引言 122

7.2 抗滑桩桩周地层侧向容许承载力分析 124

7.2.1 考虑斜坡效应与土的黏聚力效应的桩侧容许承载力 124

7.2.2 坡面超载对桩侧容许承载力的影响 127

7.2.3 地震惯性荷载对桩侧容许承载力的影响 132

7.2.4 关于抗滑桩桩周土体侧向容许承载力公式的讨论 134

7.3 基于桩周地层强度控制论的抗滑桩锚固深度问题 136

7.3.1 悬臂桩简化法 136

7.3.2 刚性桩 m 法 137

7.3.3 弹性桩 m 法 137

7.4 小结 138

第8章 抗滑桩工作性状的简化设计方法..... 139

8.1 边坡加固中抗滑桩现有设计方法 139

8.1.1 侧向受荷桩分析方法 139

8.1.2 边坡加固中抗滑桩工作性状分析 144

8.2 基于桩侧有效土压力的抗滑桩简化设计方法 146

8.2.1 基本原理 146

8.2.2 设计步骤 148

8.3 实例分析 148

8.4 小结 150

参考文献..... 152

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着现代城镇建设的迅速发展和人口的高速增长，土地资源越来越紧张。人类不得不开挖山体、利用有限的切坡地面进行工程建设，或填筑堤坝进行交通、水利等基础设施建设，这势必带来岩土边坡稳定性问题。一般来说，边坡稳定性受地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件、风化作用、降雨和地震等诸多内、外静动力因素共同影响，其复杂性由边坡分类与形态所决定，表 1.1 列出了各类边坡的划分形式（赵明阶等，2003；郑颖人等，2010）。

表 1.1 边坡的划分形式

序号	划分形式	边坡分类与形态
1	形成因素	天然边坡（或称自然边坡，包括自然山坡、江河湖海岸坡等）、人工边坡（或称工程边坡）
2	岩土性质	土质边坡（黏性土边坡、黄土边坡、膨胀土边坡、堆积土边坡、填土边坡、碎石土边坡等）、岩质边坡（按岩体强度分为硬岩、软岩和风化岩边坡；按岩体结构分为整体状、块状、层状、碎裂状、散体状）、岩土混合边坡（下部为岩层，上部为土层，即二元结构边坡）
3	稳定性程度	稳定边坡、基本稳定边坡、欠稳定边坡、不稳定边坡
4	边坡高度	高边坡（土坡总高度大于 15 ~ 20m，岩坡大于 30m）、一般边坡（土坡总高度小于 15 ~ 20m，岩坡小于 30m）
5	断面形式	直立式边坡、倾斜式边坡、台阶形边坡
6	使用年限	永久性边坡（年限大于 2 年）、临时性边坡（年限小于 2 年）
7	滑动形式	牵引式滑坡、推移式滑坡、整体式滑坡
8	破坏类型	滑坡、滑塌、崩塌、坍塌、倾倒、错落、落石
9	破坏后果	一级边坡、二级边坡、三级边坡
10	按主滑面与层面关系	顺层滑坡（主滑面顺层面）、切层滑坡（主滑面切割层面）
11	按滑坡发生时代	古滑坡（全新世以前发生的）、老滑坡（全新世以来发生，现未活动）、新滑坡（正在活动的）
12	按滑坡的规模	小型滑坡（< 10 万 m ³ ）、中型滑坡（10 ~ 50 万 m ³ ）、大型滑坡（50 ~ 100 万 m ³ ）、特大型（巨型）滑坡（> 100 万 m ³ ）
13	按滑体含水状态	一般滑坡、塑性滑坡、塑性流性滑坡
14	按滑体的厚度	浅层滑坡（厚度 $H < 6\text{m}$ ）、中层滑坡（ $6\text{m} < H < 20\text{m}$ ）、厚层滑坡（ $20\text{m} < H < 50\text{m}$ ）、巨厚层滑坡（ $H > 50\text{m}$ ）
15	按滑面剪出口位置	坡体滑坡（剪出口在边坡上出露）、坡基滑坡（滑动面在边坡脚以下）
16	按滑坡滑动速度	缓慢滑坡、间歇性滑坡、崩塌性滑坡、高速滑坡

由于不合理的开发利用、未采取有效防护措施或防护不当,经常出现大量的天然或人工边坡滑塌失稳,每年在世界范围内造成大量的人员伤亡和无法估量的财产损失(郑颖人等, 2010; 赵明阶等, 2003; 栾茂田等, 2003a, b)。在我国西南山区, 滑坡更是成为主要的地震地质灾害, 它具有分布广、数量多、强度高、危害大等特点, 如 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级特大地震, 给当地造成了毁灭性破坏; 更严重的是, 该区地势极其复杂, 震后土质松软、岩体松动, 在降雨与工程荷载等作用下又诱发了一系列山体滑坡, 加重了震区灾情。据统计, 本次地震共诱发了至少 5 万余处大小滑坡, 其中具有危害性滑坡超过 6000 余处, 所造成的经济损失占地震灾害总损失的三分之一(黄润秋等, 2008a, 2008b, 2009)。而“4.14 玉树地震”也诱发了大量山体和道路滑坡, 严重阻碍了当地的交通和救援工作, 造成了超出预期的灾害损失。除地震外, 强降雨、地下渗流、基坑或矿山开挖、风化作用、坡顶超载、交通荷载、建筑物荷载等也是诱发滑坡的主要因素。1975 年 8 月湖北秭归县由于地下水作用降低坡体的抗滑力并增大坡体下滑力使边坡沿软弱结构面发生了滑动(徐世光等, 2006); 1991 年云南头栾山体由于强风化岩体长期蠕变发生巨大滑坡对当地造成严重损失(黄润秋等, 2008a); 1994 年 9 月广东湛江太新广场由于深基坑开挖防护不当引发滑坡, 造成毗邻房屋建筑物发生不均匀沉降、倾斜甚至滑移; 2009 年 6 月重庆武隆鸡尾山由于采矿活动对山体造成扰动引发大规模崩滑造成 8 人死亡(许强等, 2009); 2010 年 2 月汉源新县城 T10 块地边坡前缘房屋基坑开挖及弃土堆载导致引发边坡两次局部蠕滑(苏银华等, 2011); 2010 年 7 月四川汉源二蛮山在前期降雨的影响下引发大规模滑坡造成 5 户村民房屋被埋, 20 多人失踪(许强等, 2010); 2011 年西北政法大学渝北校区北苑已建成的 1 号宿舍楼及在建的 D 栋宿舍楼北侧发生滑坡, 滑坡体方量大约 1 万 m^3 (杨建, 2013)。郑颖人等(2010)对近百年来世界各地的重大滑坡灾害进行了统计, 数据显示有多处滑坡造成超过万人的伤亡, 这些自然灾害严重危及人类的生命和财产安全, 无不深深触痛每位边(滑)坡科研工作者, 从而更加深刻认识到开展下边坡失稳与防灾减灾研究的重大现实意义和深远应用前景, 这也是边坡安全与滑坡防治一直能成为工程界和学术界讨论的热点问题的主要原因。

如何有效地防治滑坡灾害, 又能充分地利用有限的土地资源, 抗滑桩已受到岩土工程界的广泛关注(铁道部第二勘测设计院, 1983; 殷跃平等, 2001; 赵明阶等, 2003)。抗滑桩主要是利用稳定地层的锚固作用和被动抗力来平衡滑坡推力, 其工作原理如图 1.1 所示。与其他抗滑工程如抗滑挡墙、锚杆等相比, 抗滑桩加固边坡具有施工方便快捷, 对边坡扰动小、承载能力大、适用性强、不易恶化边坡状态, 而且还能够核实地层条件等诸多优点, 使得其在工业与民用建筑、矿山、道路、港口等工程中广泛应用, 其分类列于表 1.2。抗滑桩的布置方式也较为灵活, 它可以是单根独立布置的“桩网”, 也可以由多根桩联接构成的桩群来共同作用达到阻滑目的。同时抗滑桩可以和其他边坡治理措施灵活配合, 施工过程对边坡扰动小, 性价比高, 成孔形式多样, 各种地形地质条件皆可适用, 利用机械化施工, 在机具难以展开的地方可以采取人工挖孔。

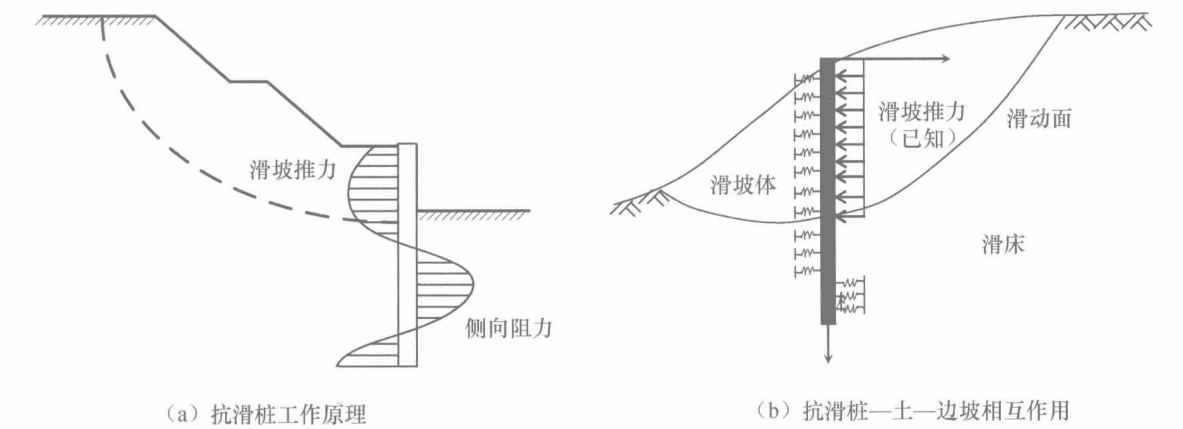


图 1.1 抗滑桩工作原理示意图

表 1.2 抗滑桩分类

序号	划分形式	抗滑桩分类
1	材料	钢桩、钢筋混凝土桩等
2	尺寸	大直径桩 ($d \geq 800\text{mm}$)、中直径桩 ($250\text{mm} < d < 800\text{mm}$)、小直径桩 ($d \leq 250\text{mm}$)
3	纵向截面形状	柱状桩、板桩、楔形桩、锥形桩
4	横向截面形状	圆形、管型、方形、矩形、十字形、H 形、箱形、多边形等
5	桩端类型	尖底与平底 (预制桩)、开口与闭口 (钢管桩)、平底与扩底 (挖孔桩) 等
6	制作工艺	预制桩、灌注桩
7	施工方法	预制桩: 打入、压入、振沉; 灌注桩: 钻孔、沉管、挖孔等
8	布置形式	单排或多排单桩、相互联接的桩网、预应力锚索桩等
9	变形破坏模式	刚性桩、弹性桩

与传统的抗滑挡墙、锚杆等加固或支护方式相比，抗滑桩具有适用范围广、抗滑能力强、施工安全简便、速度快、工程量小、投资少，不会进一步恶化滑坡环境且能有效核实

地质条件并及时调整设计方案等优点。国内外早在 20 世纪 60 年代就开始将抗滑桩应用于铁路部门的滑坡加固中，取得了良好的工程效果；90 年代在大型水电工程、建筑基坑、码头岸坡工程中得到了广泛应用，并逐渐应用于复杂地质环境、特殊坡体、坡顶超载条件下的高边坡防护中，取得了较好的加固效果，但其工作机理仍不是很清楚。近些年来切坡地面上的高层建筑、铁路与公路桥梁、高压送电线塔及信号传输塔、库区滑坡防治及移民迁建工程、基于防护开发利用滑坡的综合治理工程等开始采用大直径抗滑桩、特殊几何构形抗滑桩、多排抗滑桩、承重抗滑桩等桩基形式（何全新，1994；Ng 等，2001a；殷跃平等，2000，2005），一方面用作边坡的加固桩，另一方面又直接作为建筑物的桩基础，情况更为复杂。

然而，如何优化上述抗滑桩的几何形状、截面尺寸、锚固深度、布置方式、材料组构、力学性能，取决于滑坡推力大小与坡体特征，桩身应当满足抗弯、抗剪、抗倾斜（抗扭）等要求，以防止桩身发生倾斜甚至折断现象，或者滑坡体从桩间挤出、桩头剪切滑出，尤其在边坡顶部开展的建设工程中，抗滑桩即担当着抗滑的角色（桩后土体侧向变形所产生的

土压力作用), 又承担着上部建筑物传递的水平、竖向荷载, 兼有被动桩与主动桩双重角色, 受力情况较为复杂。由于抗滑桩工程实践时间不长, 无论在国内还是在国外, 均缺乏系统而深入的研究, 目前关于抗滑桩的承载特性、桩—土—边坡相互作用机理、荷载传递规律与边坡失稳机制等尚不十分明确, 而抗滑桩加固边坡的机理研究是抗滑桩设计计算理论的基础性问题之一, 均有待于开展深入细致地研究, 迄今为止也没有相应的分析理论与设计方法及统一的国家规范可供参考。在国内, 设计时更多地参照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) 与《桩基工程手册》中有关水平受荷桩、竖向受荷桩和被动桩的部分。因此对于这个问题, 可以说设计理论与计算方法远远落后于工程实践, 也无法满足日益增长的工程建设要求。随着我国西电东送、青藏铁路、南水北调、三江地区水电开发等世界瞩目的大型工程建设, 必将面临更多的此类岩土工程问题; 同时, 在山区城市的地质灾害防治与切坡地带房地产开发以及建筑物密集地带深基坑工程中, 桩基预加固边坡、滑坡防治与基坑维护的设计方案经常得以采用。

因此, 针对抗滑桩加固边坡工程问题, 开展桩—土—边坡相互作用机理、桩基简化分析与设计方法等方面的数值与解析研究, 认识边坡加固中抗滑桩作用的内在机理, 揭示抗滑桩—边坡系统的桩土相互作用机制, 分析桩后荷载传递规律及土拱效应, 合理设置桩间距指导抗滑桩工程的设计, 对滑坡工程防治的安全、合理、经济性具有重要理论意义和工程价值, 将为我国抗滑桩—土—边坡工程的设计与建设提供技术储备, 具有重要的科学意义, 同时在大型滑坡工程防治设计与建设中具有重要的实际应用价值。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

抗滑桩是一种大截面、侧向受荷的排桩或桩群, 它穿过滑体锚入滑床一定深度, 借助于桩的受力段及桩背土体与桩两侧的摩擦阻力以稳定滑体, 不使其从桩间滑出。其抗滑机理体现于桩、滑体、滑床三者间相互协调的工作过程中, 如图 1.1 所示。

抗滑桩作为边坡预加固或滑坡防治的主要技术措施之一, 因其诸多的优越性而在各类工程建设中为广大技术人员所采用(铁道部第二勘测设计院, 1983)。起先用于铁路工程中的边坡治理, 如我国最早于 20 世纪 50 年代在宝成铁路建设中, 采用钢筋混凝土桩整治岩石顺层滑坡; 1966 年修建成昆铁路时, 采用挖孔灌注排式单桩整治甘洛 2 号滑坡和沙北 1 号滑坡, 初步建立了一套相应的抗滑桩设计计算方法。而后在 20 世纪 70 年代与 80 年代, 抗滑桩在国内大量推广, 如 1983 年襄俞铁路赵家塘滑坡是目前我国最大最长的抗滑桩加固工程, 其单桩最大截面为 $3.5\text{m} \times 7.0\text{m}$, 最大桩长为 48m, 最大竖直开挖深度达 50m。近几十年, 铁路、公路、水电、建筑、冶金、煤炭等行业工程建设中大量地采用抗滑桩, 同时在设计、计算、施工上积累了丰富经验, 技术水平向前推进了一大步。经过多年的发展和经验的积淀, 抗滑桩加固技术已成为一种最常用并且有效的滑坡治理技术, 在各种滑坡工程的加固治理和高边坡防护设计中发挥了重要作用, 已深受广大工程师的青睐。随着城市化进程的加速, 土地资源越来越稀缺, 许多房屋建筑和相关设施不得不修建在坡地上, 由此引发了抗滑桩兼顾建筑物桩基础的新课题(何全新, 1994; Ng 等, 2001a; 殷跃平等, 2005)。

国外在 20 世纪 40 年代主要通过修建挡墙、加强排水和改良土层等技术措施进行滑坡整治, 由于高大的挡土墙造价昂贵且抗滑能力有限, 后来逐渐采用抗滑桩加固边坡, 主要在日本和欧美等国家得到应用和推广。如 1964 年, 英国某处滑坡造成山体与挡墙一并滑动, 经过采取抗滑桩加固后, 恢复稳定。日本多采用钢管混凝土钻孔桩, 有工字钢插入钢管、钢管外附补强管、双重钢管等截面形式; 1967 年, 美国旧金山某开挖公路而导致山体滑动, 通过采取混凝土灌注桩加固, 取得良好成效; 1968 年, 比利时某处由于路基加宽、扩建施工而导致牵引式滑坡, 后来通过两排抗滑桩进行整治, 使工程顺利开展; 20 世纪 70 年代以后, 奥地利公路部门将锚索和抗滑桩结合起来整治滑坡; 日本采用工字钢或复合桩 (钢管内插入工字钢再充填砂浆)、美国采用抗滑桩加固隧道工程、挪威采用锚拉桩、桩与挡土墙结合治理铁路滑坡等。至 20 世纪末期, 荷兰、意大利、俄罗斯、巴西、土耳其、墨西哥、波兰等国亦大量采用钻孔灌注型抗滑桩整治滑坡 (赵明阶等, 2003; 徐海洋, 2012)。

纵观目前国内外滑坡防治技术, 主要采用削坡卸荷、压坡脚、坡面防护、锚杆、抗滑桩、预应力锚索、锚固洞、排水、支挡结构、综合加固等方法 (张倬元, 2000), 在很多大型滑坡灾害防治工程中往往同时采用一种或几种防治措施, 其中排式单桩 (即一排或数排的若干单桩) 仍然是最多最广泛采用的一种边坡加固技术 (贺建清等, 1999; 仵磊等, 2002; 刘小丽等, 2003), 这也是抗滑桩的基本形式。此外, 还有承台式抗滑桩、桩拱墙、桩板式抗滑桩及锚拉桩等 (高永涛等, 2003; 周春梅等, 2005)。随着滑坡防治实践的不断丰富和工程经验的积累, 人们已经意识到事先预防滑坡的重要性, 对不稳定或欠稳定边坡采用抗滑桩等预加固措施。这种预加固桩的设计, 由于滑坡尚未发生, 潜在滑动面上的强度未降到其残余强度, 推力较小, 因此自然比发生的同规模滑坡要小得多 (王恭先, 2003, 2005)。这就是抗滑桩预加固边坡的优越之处, 已广泛应用于公路、铁路路基等失稳边坡治理和预加固中。显然目前的滑坡防治已从过去的以治理为主走向以预防为主, 兼顾开发性治理, 如湖北巴东二道沟滑坡整治工程 (殷跃平, 1998), 采用抗滑桩起阻滑作用, 同时还兼做立交桥基础和加固城建局大楼基础的双重作用。

近 30 年来, 许多专家学者对抗滑桩一边坡这一课题开展了大量的研究工作。梳理国内外现有文献, 抗滑桩加固边坡的研究主要集中于五个方面: ①理论分析, 通过建立各种数学物理模型, 基于桩体位移或桩侧土压力的方法, 研究土体移动对桩性状的影响; ②数值模拟研究, 主要采用有限元、有限差分方法, 建立分析对象的数值模型, 研究桩身变形和内力分布, 桩周土体应力分布和变形响应等规律; ③试验研究, 包括室内物理模型试验和现场原位测试, 其中物理模型试验有离心模型试验、小比尺模型试验等; ④土拱效应及桩土相互作用分析, 考察桩后滑坡体在桩脚处产生土拱现象, 分析滑坡推力等荷载传递过程及桩—土相互作用细观机制等; ⑤抗滑桩一边坡体系稳定性分析, 采用各类数值和解析方法求解不同地质条件和环境荷载下的桩—土一边坡体系的整体安全系数。上述五个方面各有千秋, 理论分析、数值研究与试验研究之间相辅相成, 紧密联系, 共同揭示土拱效应、荷载传递过程及桩—土相互作用细观机制, 为合理评价抗滑桩一边坡体系的整体稳定性提供了科学依据。结合以上五个方面的内容, 对近些年来具有代表性的研究成果做一综述, 以期剖析存在的问题, 缕清思路, 凝炼进一步开展研究的主要内容, 提出相应的技术路线, 为解决抗滑桩一边坡体系中的深层次科学问题和推动边坡加固中抗滑桩技术的应用奠定基础。

1.2.1 理论研究

工程中广泛采用抗滑桩技术预加固边坡或治理滑坡,但对边坡加固体进行分析时,由于极限平衡法不能考虑桩土相互作用,使得计算结果合理性与可靠性受到质疑,为此 Ito & Matsui (1975) 讨论了抗滑桩在桩周土体塑性变形影响下,桩侧水平力扩展机理,并推导出了考虑桩与土相互作用的理论分析方法,分析过程中假设桩为完全刚性,并且认为桩身周围土服从 Mohr-Coulomb 屈服准则和黏塑性准则的两种塑性状态(前者为塑性变形理论,后者则为塑性流变理论),该方法探讨了两种理论下的桩径、桩间距和土性参数等对桩侧作用力的影响,在塑性变形理论框架下计算得到桩头约束时的桩侧水平力。Ito 等(1979)考虑桩位设置、桩头约束条件、桩间距、桩身材料参数、管桩厚度以及边坡坡度等因素,对桩的受力状态及加固坡体稳定性开展了理论研究,提出了一套抗滑桩加固边坡的分析方法。Ito 等(1981)改进了抗滑桩加固滑坡的分析方法,在假定滑裂面固定的情况下,系统地分析了桩头约束条件、滑裂面以上的桩长、桩径以及钢管桩的刚度对边坡稳定性的影响。Ito 等(1982)进一步提出了多排桩加固边坡的分析方法,讨论了各种因素对抗滑桩加固滑坡的影响,通过一系列的现场试验和室内模型试验表明,该方法所得结果与实测值较为一致;在桩顶自由情况下吻合较好,在桩顶约束情况下更精确。Lee 等(1995)提出了一种基于非耦合分析的计算方法,研究抗滑桩对边坡的加固作用,这种非耦合分析方法将桩身的内力反应与坡体的稳定性分开考虑,用修正的边界单元法分析桩身的内力,用简化 Bishop 圆弧滑面法分析边坡的稳定性;认为抗滑桩加固于坡顶与坡脚所产生的效果截然不同,当桩嵌固于岩层或者较硬土层时效果更为显著;桩径、桩间距、桩侧土压力等因素相对于桩土的模量,对边坡的安全性影响更大。Chow (1996)提出抗滑桩设计的新方法,使桩身的抗滑能力得到充分的发挥。假设桩为梁单元,桩间的土体以地基反应系数概化,桩土相互作用认为是弹性状态,分别计算了单桩与群桩条件下加固效果,得到桩身弯矩与剪力分布,证实群桩加固效果显著,按单桩计算所得结果偏于保守。Hassiotis 等(1997)基于 Ito 理论提出抗滑桩加固边坡的设计计算方法,得出桩身内力与侧移的理论计算公式,给出桩间距、加固位置、桩径等因素对边坡安全系数的影响,并对桩头在四种约束条件下(自由、不转动、铰接、固接)桩身内力与位移进行分析,证实桩头在铰接或固定约束条件下对工程最为有利。然而, Hassiotis 等(1997)对桩身极限弯矩承载力的考虑并不周全,导致计算结果偏高(Hull 等, 1999)。Ausilio 等(2001)基于极限分析方法研究抗滑桩加固的边坡,首先针对无桩边坡,通过折减土的强度参数,确定了边坡安全系数,将简化 Bishop 法与上下限极限分析法对比分析,所得结果较为一致;进而针对抗滑桩加固边坡,探讨了边坡安全性及桩的加固位置问题。Zeng & Liang (2002)提出基于通用条分法、适合于任何形状滑裂面的抗滑桩加固边坡分析方法,并讨论了土拱效应问题;研究表明当桩嵌固于坚硬土层时,若各工况能产生土拱效应,将显著提高边坡的加固效果。Cai 等(2003)应用地基系数法,分析了线性水平滑动土层对柔性抗滑桩的作用,推导了抗滑桩的内力、位移表达式,其计算结果与多个历史实例吻合较好。周德培等(2004)通过研究抗滑桩加固边坡的土拱效应,提出了以桩间静力平衡、跨中截面强度以及拱脚处截面强度条件共同控制下,确定合理桩间距的计算公式,定量说明桩间距随土体黏聚力或内摩擦角的增大而增大,随桩后滑坡推力的增大而减小,并通过

工程实例给出了桩间距的计算过程, 得出了比较合理的计算结果。Nian 等 (2008) 运用基于强度折减技术的极限分析上限方法, 考虑边坡土体各向异性与不均匀性, 评价了抗滑桩加固边坡的稳定性和桩的最优加固位置问题, 结果表明土体的不均匀性和各向异性对抗滑桩加固边坡影响显著。Firat (2009) 运用粘塑性流动法的数学模型, 预测抗滑桩桩侧的水平推力, 其结果介于 Ito & Matsui (1975) 与 De Beer & Carpentier (1977) 之间; 运用 Fellenius 法 (1936)、简化 Janbu 法 (1954)、简化 Bishop 法 (1955)、Morgenstern & Price 法 (1965)、Spencer 法 (1967)、Sarma 法 (1973) 和 Fredlund & Krahn 法 (1977) 等八种前人提出的实用性方法计算了单排桩加固边坡的安全系数, 并探讨了边坡安全系数与抗滑桩加固位置的内在关系。Ma 等 (2011) 讨论了抗滑桩间距与土的变形模量对提高边坡加固效果的影响, 应用考虑桩—土相互作用的平面钢架分析模型, 研究作用于小直径钢管桩上的作用力, 将桩群间的土体假设为水平向的弹簧, 基于 Winkler 弹性地基梁理论, 推导出内力与位移的计算公式, 与现场实测数据吻合较好。Guo (2011) 提出了一种等效荷载传递方法, 模拟由土体滑移而引起的被动桩桩身反应; 该方法描述了两种常见的滑移模式 (普通和深层), 根据滑移层与稳定层的相容性条件, 分别开发了滑移层与稳定层发生弹性变形 (E-E 法)、塑性和弹塑性变形的耦合方法 (P-PE 法) 计算程序; 研究显示 E-E 法对无限桩长的深层滑移是行之有效的, P-PE 法更适用于在滑移层发生刚性转动的短桩。Ashour 等 (2012) 提出了新的抗滑桩加固边坡稳定性计算程序, 考虑了桩土相互作用下滑裂面以上桩段的土压力大小和分布特征; 重点研究了土体类型、桩径、加桩位置、桩间距等对边坡安全系数的影响, 并通过一系列满荷载试验证实了该法的有效性。

1.2.2 数值模拟

近几年, 计算机技术迅猛发展, 软硬件不断更新, 涌现出一大批商用软件 (ABAQUS, ANSYS, ADINA, PLAXIS, FLAC, PFC 等), 使得数值计算变得更容易。对于常用的数值分析方法, 主要包括有限单元法、有限差分法、离散单元法等。Duncan 等 (1996) 从诸多方面分析了有限单元法相对传统极限平衡法的优缺点。Griffiths 等 (1999, 2007) 以有限元计算不收敛作为边坡失稳判据, 分别对具有简单体型的二维、三维边坡进行了数值分析, 证实有限元法比传统极限平衡法的优越性。Dawson 等 (1999) 应用有限差分软件 FLAC 计算了多种工况下的边坡稳定安全系数, 并与上限极限分析法进行了比较, 其结果在容许的范围内。通常情况下, 数值分析方法先概化地质模型, 再确立二维或三维计算模型, 最后通过编写的计算程序或大型商用数值软件完成计算所要工况。随着 Zienkiewicz 等 (1975) 提出边坡稳定性评价的强度折减法 (Strength Reduction Method, 简称 SSR 法), 基于强度折减技术的各类数值方法在二维和三维边坡稳定性分析中得到了广泛应用 (Ugai, 1989, 1995; Matsui & San, 1992; Griffith & Lane, 1999; 连镇营等, 2001; 栾茂田等, 2003c; 年廷凯等, 2004, 2006, 2007a, 2008a, 2013a, b, c)。

在抗滑桩加固边坡的计算中, 通过强度折减数值方法, 不仅能够得到边坡稳定安全系数, 而且综合考虑桩土相互作用条件, 获得各种工况条件下的桩身变形和内力分布、桩间土拱效应、桩周土体应力分布和变形响应等。Chen 等 (1993) 为了获得桩在水平推力作用下的桩—土相互作用, 提出了有限元与无限元相结合的数值分析方法, 确定了影响极限侧阻力