

# 柔性支挡结构的 静动力稳定性分析

朱彦鹏 董建华 © 著



Static and Dynamic Stability Analysis of Flexible Retaining Structure



科学出版社

# 柔性支挡结构的静动力稳定性分析

朱彦鹏 董建华 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是作者团队近 20 年研究柔性支挡结构系列成果的总结, 主要介绍柔性支挡结构的承载力、静力稳定性和动力稳定性的计算方法和工程应用情况, 旨在帮助读者了解柔性支挡结构的结构形式、特点和应用范围, 掌握柔性支挡结构的分析和设计计算方法。

本书内容系统, 理论和实践相结合, 可供土建专业的师生和设计、施工等工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

柔性支挡结构的静动力稳定性分析/朱彦鹏, 董建华著. —北京: 科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-043601-6

I. ①柔… II. ①朱…②董… III. ①柔性结构—支挡结构—静力学—动力学—稳定性—分析 IV. ①TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 044942 号

责任编辑: 陈晓萍 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 北大彩印

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 20 1/4

字数: 470 000

定价: 72.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62142126 编辑部电话 010-62138978-2009

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 前 言

柔性支挡结构是近半个世纪迅速发展起来的一种新型支挡结构形式,主要有加筋土挡墙、土钉墙、复合土钉墙、框架预应力锚杆支护结构、排桩预应力锚杆和其他锚固体体系等,这种支挡结构的特点是柔性挡土结构、岩土体与锚固体体系协同工作,岩土体作为支挡结构的组成部分并发挥稳定边坡的作用。由于柔性支挡结构造价较低、稳定性好、可用于高边坡甚至超高边坡支护,受到工程单位的普遍欢迎,在我国山区特别是西部地区得到了广泛应用,汶川“5·12”地震中这种支挡结构大都完好,充分表现了这种支挡结构良好的稳定性和抗震性能,但是,这种支护结构是挡土结构、锚固体和岩土体协同工作的复杂结构体系,其承载力、稳定性分析一直是理论研究的一大难题,其地震动力响应和地震动力稳定性分析更是难度很大,影响了理论研究的发展,因此,一般认为,工程实践超前于理论研究。

作者从 20 世纪 90 年代中期开始,带领研究团队一直关注和研究永久性柔性支挡结构的稳定性分析方法、地震动力响应和地震动力稳定性,作者指导的 6 位博士和 20 多位硕士均以各种柔性支挡结构静动力稳定性作为选题,研究工作得到国家支撑计划“白龙江流域滑坡泥石流工程防治技术研究与示范”(项目编号:2011BAK12B07)、国家自然科学基金“永久性柔性边坡支挡结构的地震作用和动力稳定性分析”(项目编号:50978129)、“框架预应力锚杆边坡锚固结构的地震响应控制及振动台试验研究”(项目编号:51108221)、“季节性冻土区新型边坡支护结构静动力特性及试验研究”(项目编号:51268037)和教育部“长江学者创新团队发展计划”中“西部恶劣环境下土木工程防灾减灾研究”项目的支持。连续不断的支持,使研究工作能够持续进行。另外,作者于 2002~2006 年曾承担西部交通建设科技项目“国道 G212 公路(兰州—重庆)陇南段修建技术研究”中子课题四“滑坡、泥石流防治工程的合理结构型式和构造研究”(项目编号:2002 318 000 36-4-1)、甘肃省自然科学基金项目“支挡结构的分析与设计方法研究及其在黄土地区的应用”(项目编号:ZS032-B25-021)和甘肃省科技攻关计划项目“永久性柔性边坡支挡结构的地震作用分析与设计”(课题编号:2GS064-A52-040)等,为柔性支挡结构静动力稳定性分析做了大量的前期工作。

本书是作者和学生们共同完成的一部拙作,主要内容包括:加筋土挡墙的承载力及整体稳定性分析;土钉墙的承载力及静力稳定性;框架预应力锚杆支护结构的承载力及静力稳定性;考虑预应力作用的框架锚杆支护边坡的稳定性分析;排桩预应力锚杆支护结构分析;预应力锚杆支护边坡的稳定性分析;土钉复合锚杆支护边坡的稳定性分析;加筋挡土墙动力稳定性分析;土钉墙地震响应和地震动力稳定性分析方法;框架预应力锚杆边坡支护结构的地震动力稳定性分析;基于应力状态的锚固边坡动力稳定和桩锚边坡支护结构地震动力响应计算方法等。本书是作者团队近 20 年来研究柔性支挡结构系列成果的总结,希望本书出版以后能够对柔性支挡结构的理论研究和工程应用有推动作用。

本书是作者和其博士毕业生董建华教授共同完成，第1~8章由朱彦鹏完成，第9~12章由董建华完成。博士生李忠、周勇、贾亮、叶帅华和王邓崧的研究工作为本书的完成做出了很大贡献，硕士生郑善义、谢强、陈世龙、李海珠、王卫华、魏升华、李元勋、任永忠、吴意谦等的研究工作也有不同程度的贡献，在此对他们的工作表示衷心感谢。

由于编著时间仓促，加之著者水平有限，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

朱彦鹏

2014年12月6日

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                 | 1  |
| 1.1 边坡破坏模式及分类            | 2  |
| 1.1.1 引言                 | 2  |
| 1.1.2 边坡破坏模式及分类          | 2  |
| 1.2 边坡防护技术与柔性支挡结构研究应用现状  | 4  |
| 1.3 柔性支挡结构的静力稳定性分析       | 6  |
| 1.4 柔性支挡结构的动力稳定性分析       | 8  |
| 1.4.1 拟静力法               | 11 |
| 1.4.2 Newmark 滑块位移法      | 14 |
| 1.4.3 剪切梁或剪切楔法           | 16 |
| 1.4.4 数值分析法              | 17 |
| 1.4.5 概率分析法              | 18 |
| 1.4.6 试验分析法              | 19 |
| 1.4.7 柔性支挡结构地震动稳定性需解决的问题 | 20 |
| 参考文献                     | 20 |
| 第 2 章 加筋土挡土墙承载力及静力稳定性    | 26 |
| 2.1 概述                   | 26 |
| 2.2 加筋土挡土墙承载力            | 27 |
| 2.2.1 加筋挡土墙的构造及工作原理      | 27 |
| 2.2.2 加筋土挡土墙的承载力         | 31 |
| 2.3 加筋挡土墙静力稳定性验算         | 34 |
| 2.3.1 整体稳定性筋带拉力计算        | 34 |
| 2.3.2 整体稳定性计算            | 35 |
| 2.4 案例分析及数值验证            | 35 |
| 参考文献                     | 37 |
| 第 3 章 土钉墙的承载力及静力稳定性      | 38 |
| 3.1 概述                   | 38 |
| 3.2 土钉墙的工作原理             | 39 |
| 3.3 土钉墙的承载力计算            | 41 |
| 3.3.1 土钉墙荷载计算            | 41 |
| 3.3.2 土钉抗拉承载力计算          | 43 |
| 3.4 土钉墙整体稳定性验算           | 44 |
| 3.4.1 建立滑移面搜索模型          | 45 |
| 3.4.2 最危险滑移面确定           | 47 |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 3.4.3 | 软件的开发                      | 48  |
| 3.5   | 土钉墙的优化设计                   | 48  |
| 3.5.1 | 土钉墙的优化设计方法                 | 48  |
| 3.5.2 | 土钉墙稳定性分析实例                 | 51  |
| 3.5.3 | 土钉墙的优化设计方法的特点              | 53  |
|       | 参考文献                       | 54  |
| 第4章   | 框架预应力锚杆支护结构的承载力及静力稳定性      | 56  |
| 4.1   | 概述                         | 56  |
| 4.2   | 框架预应力锚杆挡墙上作用的土压力           | 58  |
| 4.3   | 框架预应力锚杆边坡支护结构分析            | 59  |
| 4.3.1 | 框架格构梁的计算模型                 | 60  |
| 4.3.2 | 空间杆件有限元法计算框架格构梁结构          | 61  |
| 4.4   | 框架预应力锚杆支护结构的整体倾覆稳定         | 66  |
| 4.4.1 | 单层锚杆的稳定和框架预应力锚杆支护结构的整体倾覆稳定 | 66  |
| 4.4.2 | 框架预应力锚杆支护边坡的滑移稳定性计算模型      | 66  |
| 4.4.3 | 框架预应力锚杆挡墙的整体滑移稳定验算         | 67  |
| 4.4.4 | 软件设计                       | 73  |
| 4.4.5 | 工程实例计算与分析                  | 73  |
| 4.5   | 考虑预应力作用的框架预应力锚杆支护边坡的稳定性分析  | 79  |
| 4.5.1 | 框架预应力锚杆支护结构的工作过程           | 79  |
| 4.5.2 | 考虑预应力的框架锚杆支护边坡稳定性的一种简化分析   | 80  |
| 4.5.3 | 框架预应力锚杆支护边坡参数分析            | 86  |
| 4.5.4 | 与现有边坡分析软件对比验证              | 90  |
| 4.6   | 框架预应力锚杆支护结构的试验研究           | 90  |
| 4.6.1 | 试验基本思路                     | 90  |
| 4.6.2 | 试验场地和试验设备                  | 91  |
| 4.6.3 | 试验材料                       | 91  |
| 4.6.4 | 模型设计和试验测点布置                | 91  |
| 4.6.5 | 试验结果及分析                    | 94  |
| 4.7   | 小结                         | 98  |
|       | 参考文献                       | 99  |
| 第5章   | 排桩预应力锚杆支护结构分析              | 100 |
| 5.1   | 悬臂式排桩、地下连续墙支护结构承载力         | 100 |
| 5.2   | 单层支点排桩、地下连续墙支护结构的承载力       | 102 |
| 5.3   | 多层预应力锚杆排桩支护结构的承载力及稳定性      | 106 |
| 5.3.1 | 排桩预应力锚杆支护结构的计算模型           | 107 |
| 5.3.2 | 排桩锚杆支护结构的分析与设计             | 110 |
| 5.3.3 | 工程实例                       | 112 |
| 5.4   | 采用位移土压力模型的排桩预应力锚杆支护结构分析    | 114 |

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 5.4.1 | 计算模型的建立               | 115 |
| 5.4.2 | 刚性系数的确定               | 115 |
| 5.4.3 | 差分方程的建立               | 116 |
| 5.4.4 | 边界条件                  | 117 |
| 5.4.5 | 桩身位移和内力的计算            | 118 |
| 5.4.6 | 工程实例分析                | 118 |
| 5.4.7 | 结论                    | 119 |
| 5.5   | 混合法在深基坑排桩锚杆支护计算中的应用研究 | 119 |
| 5.5.1 | 计算模型的建立               | 120 |
| 5.5.2 | 混合法公式的推导              | 121 |
| 5.5.3 | 工程算例                  | 123 |
| 5.5.4 | 结论                    | 125 |
| 5.6   | 小结                    | 125 |
|       | 参考文献                  | 125 |
| 第 6 章 | 预应力锚杆支护边坡的稳定性分析       | 127 |
| 6.1   | 概述                    | 127 |
| 6.2   | 预应力锚杆加固边坡原理           | 128 |
| 6.2.1 | 岩土锚杆的类型和特征            | 128 |
| 6.2.2 | 预应力锚杆的组成              | 128 |
| 6.2.3 | 预应力锚杆的支护原理            | 128 |
| 6.3   | 锚杆支护边坡的设计方法           | 129 |
| 6.3.1 | 锚杆的内力计算               | 129 |
| 6.3.2 | 锚杆极限拉拔承载力验算           | 130 |
| 6.3.3 | 锚杆长度确定                | 131 |
| 6.3.4 | 锚杆预应力的计算              | 132 |
| 6.3.5 | 锚杆支护边坡的稳定性分析          | 132 |
| 6.4   | 附加应力法在锚杆支护边坡稳定性分析中的应用 | 133 |
| 6.4.1 | 附加应力法简介               | 133 |
| 6.4.2 | 附加应力对边坡稳定性的影响         | 133 |
| 6.4.3 | 预应力引起的附加应力的估算         | 137 |
| 6.4.4 | 附加应力估算方法的数值验证         | 139 |
| 6.4.5 | 附加应力分量对支护边坡稳定性的影响     | 145 |
| 6.4.6 | 预应力锚杆支护边坡稳定性参数分析      | 148 |
| 6.5   | 小结                    | 151 |
|       | 参考文献                  | 152 |
| 第 7 章 | 土钉复合锚杆支护边坡的稳定性分析      | 153 |
| 7.1   | 概述                    | 153 |
| 7.2   | 破坏模式                  | 153 |
| 7.2.1 | 体外破坏                  | 153 |



|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 7.2.2 | 体内破坏                   | 154 |
| 7.3   | 多排土钉加一排或两排锚杆           | 156 |
| 7.3.1 | 稳定性分析模型的建立             | 156 |
| 7.3.2 | 算例分析                   | 157 |
| 7.4   | 多排土钉加多排锚杆              | 158 |
| 7.4.1 | 稳定性分析方法的选取             | 158 |
| 7.4.2 | 算例分析                   | 159 |
| 7.5   | 小结                     | 159 |
|       | 参考文献                   | 160 |
| 第 8 章 | 加筋挡土墙动力稳定性分析           | 161 |
| 8.1   | 概述                     | 161 |
| 8.2   | 筋带-土体动力模型建立及内部稳定性分析    | 162 |
| 8.2.1 | 筋带-土体系统动力模型的建立及筋带动拉力计算 | 162 |
| 8.2.2 | 地震动力作用下筋带设计            | 165 |
| 8.2.3 | 案例分析及数值验证              | 166 |
| 8.2.4 | 结论                     | 169 |
| 8.3   | 地震作用下加筋挡土墙整体稳定性分析      | 169 |
| 8.3.1 | 地震作用下加筋挡土墙整体失稳破坏模式     | 170 |
| 8.3.2 | 地震作用下加筋挡土墙整体稳定性分析      | 171 |
| 8.3.3 | 实例分析                   | 178 |
| 8.4   | 地震作用下加筋挡土墙稳定性可靠度研究     | 181 |
| 8.4.1 | 引言                     | 181 |
| 8.4.2 | 可靠度基本原理                | 182 |
| 8.4.3 | 地震作用下加筋挡土墙稳定性可靠度分析     | 184 |
| 8.4.4 | 实例分析                   | 188 |
| 8.4.5 | 结论                     | 193 |
| 8.5   | 地震作用下加筋挡土墙位移计算         | 193 |
| 8.5.1 | 地震作用下加筋挡土墙的位移计算原理      | 194 |
| 8.5.2 | 地震作用下加筋挡土墙位移计算         | 197 |
| 8.5.3 | 确定最危险滑移面时的屈服加速度        | 202 |
| 8.5.4 | 基于位移控制的加筋挡土墙设计         | 203 |
| 8.5.5 | 案例分析及数值验证              | 203 |
| 8.5.6 | 结论                     | 205 |
| 8.6   | 小结                     | 206 |
|       | 参考文献                   | 206 |
| 第 9 章 | 土钉墙的地震动力响应及其动力稳定性      | 209 |
| 9.1   | 概述                     | 209 |
| 9.2   | 土钉土体系统动力模型的建立          | 209 |
| 9.3   | 简谐地震作用下土钉土体系统的响应分析     | 211 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 9.3.1 案例分析                      | 212 |
| 9.3.2 数值验证                      | 214 |
| 9.3.3 土钉抗震承载力验算                 | 215 |
| 9.3.4 结论                        | 215 |
| 9.4 土钉支护边坡动力模型的建立及地震响应分析        | 215 |
| 9.4.1 引言                        | 215 |
| 9.4.2 动力计算模型的建立                 | 217 |
| 9.4.3 简谐地震作用下土钉支护边坡地震响应分析       | 222 |
| 9.4.4 工程算例                      | 225 |
| 9.4.5 结论                        | 230 |
| 9.5 地震作用下土钉支护边坡稳定性分析            | 230 |
| 9.5.1 引言                        | 230 |
| 9.5.2 动力稳定性模型一                  | 231 |
| 9.5.3 动力稳定性模型二                  | 238 |
| 9.5.4 工程算例                      | 244 |
| 9.5.5 结论                        | 245 |
| 9.6 地震作用下土钉支护边坡永久位移计算方法         | 246 |
| 9.6.1 引言                        | 246 |
| 9.6.2 地震作用下土钉支护边坡永久位移计算模型       | 246 |
| 9.6.3 案例分析及数值验证                 | 254 |
| 9.6.4 结论                        | 257 |
| 9.7 小结                          | 257 |
| 参考文献                            | 258 |
| 第 10 章 框架预应力锚杆边坡支护结构地震动力响应及其稳定性 | 261 |
| 10.1 概述                         | 261 |
| 10.2 框架预应力锚杆边坡支护结构-锚杆动力计算模型     | 262 |
| 10.2.1 框架预应力锚杆动力方程              | 262 |
| 10.2.2 坡后地基土体动力方程               | 264 |
| 10.3 框架预应力锚杆边坡支护结构地震响应分析        | 264 |
| 10.3.1 坡后地基土体地震响应               | 264 |
| 10.3.2 框架预应力锚杆地震响应              | 265 |
| 10.3.3 工程算例及分析                  | 267 |
| 10.3.4 结论                       | 270 |
| 10.4 框架预应力锚杆边坡支护结构框架地震动力响应计算方法  | 271 |
| 10.4.1 引言                       | 271 |
| 10.4.2 框架预应力锚杆边坡支护结构框架动力计算模型    | 271 |
| 10.4.3 简谐地震作用下框架锚杆动力响应分析        | 273 |
| 10.4.4 案例分析及数值验证                | 275 |
| 10.4.5 结论                       | 279 |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 10.5 框架预应力锚杆边坡支护结构动力稳定性计算 .....          | 280        |
| 10.5.1 引言 .....                          | 280        |
| 10.5.2 震害分析 .....                        | 280        |
| 10.5.3 框架预应力锚杆边坡支护结构地震动力稳定性 .....        | 280        |
| 10.5.4 工程实例 .....                        | 288        |
| 10.5.5 结论 .....                          | 291        |
| 10.6 小结 .....                            | 291        |
| 参考文献 .....                               | 292        |
| <b>第 11 章 基于应力状态的锚固边坡动力稳定性计算方法 .....</b> | <b>294</b> |
| 11.1 概述 .....                            | 294        |
| 11.2 似黏聚力理论及计算 .....                     | 295        |
| 11.3 边坡应力场计算 .....                       | 296        |
| 11.3.1 静力应力场 .....                       | 296        |
| 11.3.2 地震拟静力应力场 .....                    | 297        |
| 11.4 锚固边坡动力稳定性计算 .....                   | 299        |
| 11.5 案例分析 .....                          | 301        |
| 11.5.1 工程概况 .....                        | 301        |
| 11.5.2 稳定性验算及设计结果 .....                  | 301        |
| 11.5.3 动力有限元时程强度折减法计算结果 .....            | 302        |
| 11.6 小结 .....                            | 303        |
| 参考文献 .....                               | 304        |
| <b>第 12 章 桩锚边坡支护结构地震动力响应计算方法 .....</b>   | <b>305</b> |
| 12.1 概述 .....                            | 305        |
| 12.2 单层预应力锚杆桩锚边坡支护结构动力运动方程 .....         | 305        |
| 12.2.1 桩土动力相互作用计算 .....                  | 305        |
| 12.2.2 桩土动力运动方程的建立 .....                 | 307        |
| 12.2.3 桩土动力运动方程的求解 .....                 | 309        |
| 12.3 工程应用及数值仿真 .....                     | 309        |
| 12.3.1 工程概况 .....                        | 309        |
| 12.3.2 地震动力响应分析 .....                    | 310        |
| 12.3.3 数值仿真 .....                        | 311        |
| 12.3.4 抗震设计 .....                        | 312        |
| 12.4 小结 .....                            | 313        |
| 参考文献 .....                               | 313        |

# 第 1 章 绪 论

近年来,深基坑开挖支护和边坡加固成为工程界逐渐关注的焦点。伴随着经济的高速发展,城市的规模也在不断扩大,这迫使要求开发“高、纵、深”的三维城市空间,以满足人们日益增长的生产、生活需要。其中“深”就是发展地下空间,这包括高层、超高层建筑的地下室、地下铁路及地下车站、地下停车库、地下商场、地下民防工事以及各种地下工业与民用建筑设施等。如此众多地下空间的开发利用都面临一个复杂的技术难题——深基坑开挖支护。由于建筑结构和使用功能上的要求,基坑开挖的深度越来越大,浅则 5~6m,深可达 50.0m 左右。随着位于地下管道密集或建筑物集中区域的深大基坑的大量涌现,其中部分深基坑的复杂程度已经赶上甚至超过国际上已有的深基坑工程,因此,深基坑支护与降水,这一技术难题便摆在了我国土木工程界人士的面前。我国城市高层和超高层建筑及地铁的修建使得建筑物密集程度的增加,超深基坑开挖的环境风险越来越大,因此,需要解决深基坑支护结构的选型、深基坑降水与支护结构稳定性的风险评估和深基坑支护结构的现场试验与监测等问题,这样才能保证建筑的稳定。

随着对支护结构理论研究和工程实践的不断深入,国内外工程界对“支护”概念上的理解已经发生变化,它不仅是指基坑坑壁和坡体的安全与稳定的防护结构措施,而且还包括与施工程序的配合、环境效应的考虑、临时支护结构与地下室永久性保护作用相结合、地基土、建筑物桩基与支护结构的协同作用、地基土的加固、基坑周边建筑物、交通道路、公用市政设施、地下管线的保护等内容。“支护”应看成一个系统工程,对深基坑支护和边坡加固必须从“支护体系”的概念出发,应用“支护体系理论”来分析和解决实际工程问题。

另外,我国是一个地质环境复杂的国家,边坡在我国的分布相当广泛,无论是自然滑坡、崩塌以及泥石流等地质灾害,还是人类的工程活动引起的边坡不稳定灾害,都给国家的经济建设造成巨大损失。西北地区是我国滑坡多发地区,近几年发生了东乡特大滑坡、西安灞桥特大滑坡、永靖特大滑坡等多起滑坡泥石流灾害,造成重大的生命和财产损失。此外,由于大量高铁、高速公路和高填方机场等工程的修建,产生了大量的工程高边坡。例如,在兰临高速公路袁家湾子的挖方边坡施工中,于 2003~2004 年连续三次滑坡,经过三次变更设计造成很大浪费,但还是在高速公路通车后又于 2004~2005 年出现连续三次大滑坡,经过三次维修,现在仍处于不稳定状态,影响了高速公路的正常使用。在兰州至定西段高速公路工程投入使用后,滑坡不断,维修也不断,使高速公路经常处在不正常的运行中,陇海铁路甘肃段几乎每年都有滑坡产生,铁路运行受到极大影响,究其原因主要是边坡支护结构采用的多为传统意义的挡土墙,设计中未充分考虑其特殊的使用地质条件和环境条件。边坡对建筑、公路、铁路和水利水电工程的安全威胁有时是不可想象的,为保证建筑、高速公路和铁路等的使用安全,边坡加固治理已成为我国的一项重要基础

设施建设,许多科研机构为此付出了大量艰辛的劳动。随着我国西部高铁、西气东输、西油东送以及西北地区高速公路和城市建设快速发展,大多属于山区和丘陵地区的西北黄土地区出现了大量的工程边坡和高边坡,采用柔性支挡结构进行支护可做到安全可靠并能降低工程造价。但是,新型柔性支护边坡承载力、静动力稳定性分析和设计又是一个新的理论和技术难题。

## 1.1 边坡破坏模式及分类

### 1.1.1 引言

人类对岩土基坑、高边坡破坏模式的研究已有数十年的历史。破坏模式选取不当,再精确的设计,再先进的工法也难以达到设计施工的预期目的。破坏模式是稳定性分析的基本依据,一定的边坡破坏模式在一定程度上揭示了边坡的变形破坏形态和机理,反映了边坡变形破坏的本质,离开破坏模式的稳定性分析具有某种盲目性,其结果或者使工程隐含风险,或者造成不必要的浪费。

目前,边坡破坏模式的研究已经由简单破坏模式进一步发展到复杂破坏模式<sup>[1]</sup>。在国外,1916年,Petterson和Hultin提出了均质黏土中的圆弧破坏模式;1953年,Toms和Fukuoka分别提出了土坡的复旋滑和黏土的连续单滑破坏模式;1946年,新西兰的Benson叙述了倾斜的砂质黏土岩上的玄武岩块的平移块滑破坏模式;1954年,Henkel和Skempton提出了由初期片滑发展起来的复合平移滑动破坏模式;1953年,Legget和Bartey提出了泥流破坏模式;1955年,Skaven-Haug阐述了流滑破坏模式;1961年,Bazett等提出了下伏于超固黏结土层下的纯砂层或粉土层的崩塌破坏模式;1977年,英国岩石力学家Hoek经过详细的研究,在前人工作的基础上,归纳出岩体边坡的破坏模式主要有4种,即圆弧破坏模式、平面破坏模式、楔形破坏模式和倾倒破坏模式;1972年,Nemcok等归纳出了岩石滑坡-岩崩组合破坏模式;1973年,Sharp归纳出了滑坡-土流组合破坏模式。

近年来,国内工程技术人员也有很多研究成果,在一定程度上发展和促进了破坏模式的研究,比较有代表性的论述有<sup>[2]</sup>:中国地质大学李铁汉等,以推移面形态、数目、结合特征以及岩体的力学性质,将边坡变形破坏划分为5类,每类中又分为若干亚类;中科院地质所孙玉科等,考虑工程地质岩组特征、岩体结构、初始应力场、破坏形态、水文地质和变形破坏时间效应6个方面,提出了5种地质模型;中国科学院地质与地球物理研究所丁恩保等,以岩体结构为最基本的控制因素,考虑了结构面组合形态、岩性、地应力和地下水,同时也考虑了滑床、滑体形态和变形破坏方式等,提出了8种中国露天矿边坡变形破坏模式;总参工程兵三所结合深基坑支护,对软土和强膨胀土的破坏形态和机理进行了初步试验研究,提出了流鼓破坏模式和胀裂破坏模式<sup>[3]</sup>。

### 1.1.2 边坡破坏模式及分类

边坡破坏模式主要取决于坡体地质条件。坡体结构是坡体内岩土体的分布和排列顺序、位置、形状及其与临空面之间的关系,其构成坡体的地质基础,主要是控制了推移

面（带）的位置和形状。对于一般土质边坡而言，坡体结构相对均匀、单一，边坡破坏模式也相对简单，比较常用的主要有以下几种模式<sup>[4]</sup>。

### 1. 圆弧破坏模式

圆弧破坏模式如图 1.1 和图 1.2 所示。对于均质的黏性土土坡，其实际滑移面与柱面接近，计算时一般假定滑移面为圆柱面，截面为圆弧。稳定性分析通常采用条分法，主要适用于以下几类岩土介质：①一般土质边坡（黏土）；②厚层杂填土；③松散碎裂岩体；④页岩。

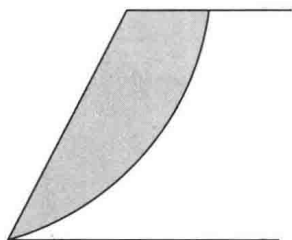


图 1.1 圆弧破坏示例



图 1.2 危地马拉山体滑坡

### 2. 折线破坏模式

折线破坏模式如图 1.3 和图 1.4 所示。折线破坏模式通常发生在土体下部有不规则的可能滑移面存在的场合，如坡积土层中。在该滑移面下部，一般为基岩或硬土层，滑移面多呈不规则的折线形。折线破坏为土体内累积滑坡推力超过折线滑动累积抗剪强度所造成的破坏。对此类型边坡的稳定性评价一般采用国家规范《岩土工程勘察规范》（GB50021—2001）中推荐的不平衡力法。

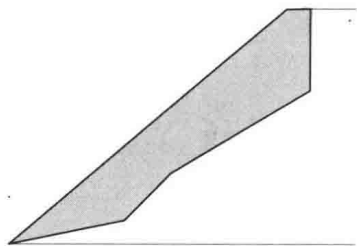


图 1.3 折线破坏示例



图 1.4 台湾“北二高”基隆段山体大滑坡

### 3. 流鼓破坏模式

流鼓破坏模式通常发生在较单一的厚软土边坡中。试验研究证实，刚体转动假设不适用于软土边坡稳定性分析，软土边坡不取圆弧破坏模式，流鼓破坏的机理为受饱和土中水的强烈影响，边坡开挖后，边壁变形呈鼓形分布形态，它是土体在自重重力及侧压力作用下，铅直应力线发生偏转、弯曲的结果；在边壁土体内形成一条宏观断续的优

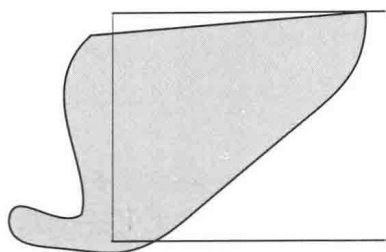


图 1.5 流鼓破坏示例

势滑移控制线，其破坏机理为该滑移面上土体抗剪强度的丧失，致使土体最终产生如图 1.5 所示的破坏形态。流鼓破坏模式的滑移控制线可近似用分段函数来描述。

#### 4. 崩塌破坏模式

崩塌破坏示例如图 1.6 和图 1.7 所示。崩塌破坏发生在岩石和土壤边坡中，天然的黄土陡坡也可能产生崩塌破坏。崩塌破坏的机理为：当剪应力  $\tau$  超过极限抗剪强度时，边坡将发生较大的应变或位移，使剪应力降低；当下滑力在岩土介质中产生的剪应力超过最大强度时，不稳定体下滑力或滑移面上的剪应力并不减小，发生应变或位移的速率将大大增加；又因摩擦一旦发生， $\phi$  值即降低， $c$  值骤然变为零，抗滑力很快减小。

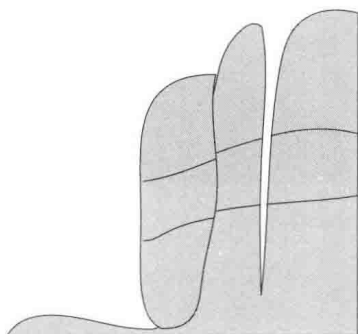


图 1.6 崩塌破坏示例



图 1.7 黄土崩塌

如上所述，边坡破坏模式呈现出多样性。然而，一定的破坏模式取决于一定的岩土介质物理力学性质。对于一般土质边坡而言，人们通过大量的破坏试验和破坏工程观察，在相关文献<sup>[5]</sup>中，以及现行国家规范<sup>[6, 7]</sup>中，对于土体及软岩质类边坡，认为其破坏模式近似为圆弧形破坏，滑移面形状可近似为圆弧形。根据王恭先<sup>[8]</sup>所述，在边坡防治中根据可能形成滑移面（带）的地层和位置，对于土质边坡可归为均质坡体结构的范畴，主要是构成坡体的岩土体近乎均质体，其变形破坏不受层面或构造结构面控制，而受坡体内应力分布和变化及土体强度的控制，如均质黏性土、类均质黄土、岩体的全、强风化残积层及人工堆填的类均质土坡等，边坡的滑移面在该类土中呈近圆弧状，边坡破坏模式属于旋转式滑动破坏。因此，对于一般土质边坡而言，在进行稳定性分析和计算时，可近似认为边坡破坏模式为旋转式破坏，滑移面形状为圆弧形。

## 1.2 边坡防护技术与柔性支挡结构研究应用现状

为了保证基坑开挖过程和边坡的治理加固后的稳定，大量科研人员和工程技术人员都在致力于研究各种各样的支护方法和加固手段，对支护方面的课题进行了大量的理论研究和试验测试，支护加固技术取得了很大的进步。目前，用于深基坑开挖支护和边坡加固的方法主要有传统意义上的挡土墙<sup>[9~12]</sup>、土钉支护结构<sup>[13~16]</sup>、复合土钉支护结构<sup>[17, 18]</sup>、预应力锚杆柔性支护技术<sup>[19, 20]</sup>、框架预应力锚杆柔性支护结构<sup>[21~24]</sup>、预应



力锚索地梁结构<sup>[25, 26]</sup>等。在上述方法中,挡土墙由于其断面尺寸大、费时、费力等缺点在基坑和边坡工程中应用得越来越少;土钉支护结构只能用于开挖深度较浅,对变形要求不严格的工程;复合土钉支护结构由于其不仅具有土钉支护的优势,而且能充分发挥其他支护方法的作用,因此具有广泛的应用领域和适用范围;预应力锚杆柔性支护技术由于其强大的预应力作用,改变了基坑边坡的受力状态,减小了基坑的坡面位移,特别适用于位移控制要求严格的基坑及超深基坑的支护<sup>[27]</sup>;预应力锚索地梁结构由于锚索具有很强的抗拉能力,多用于岩质边坡和大中型滑坡工程的治理;框架预应力锚杆支护结构由于锚杆与框架的空间协同工作,能够承受较大的土压力,在基坑开挖支护和土质边坡(小型滑坡)加固工程中得到广泛应用。

在上述基坑开挖支护和边坡加固方法中,框架预应力锚杆柔性支护结构是最近几年被提出并得到广泛应用的新型支护结构,它是在预应力锚杆柔性支护技术基础上发展起来的。图 1.8 和图 1.9 分别为采用框架预应力锚杆柔性支护结构的方案效果图和支护图。由于关于框架预应力锚杆柔性支护结构的研究成果不多,因此其设计理论远远落后于工程应用。在国家标准或行业标准的相关设计规范,如《铁路路基支挡结构设计规范》(TB10025—2006)<sup>[28]</sup>、《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB50086—2001)<sup>[29]</sup>、《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120—2012)<sup>[6]</sup>、《建筑边坡工程技术规范》(GB50300—2013)<sup>[7]</sup>中还没有对其具体设计计算原则和方法作出明确的规定和说明。因此,工程设计人员一般都只按照各自的设计原则并结合地区特点进行设计,设计方法差别较大,治理效果也各不相同。另外,在现有设计中,通常是依据一些简化计算方法进行框架预应力锚杆柔性支护结构的强度设计和稳定性的定性判断,而不能进行稳定性的量化分析,同时对支护结构引起的基坑或边坡变形在设计中没有考虑,对锚杆的设计也多从经验出发,因此往往导致设计不当,这不仅给工程项目造成较大的经济浪费,也频频引起工程事故的发生,造成了巨大的生命财产损失和不良的社会影响。

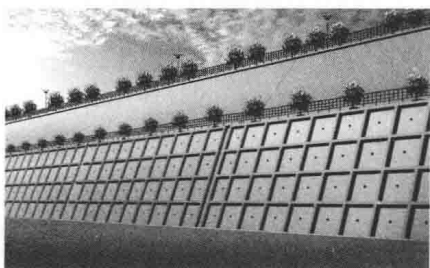


图 1.8 土钉-框架预应力锚杆支护边坡效果图



图 1.9 某超高边坡土钉框架预应力锚杆支护图

基于上述各方面的分析,加强设计理论研究,制定相应的规范,是一项十分紧迫的工作。针对框架预应力锚杆柔性支护结构设计理论不完善、计算不准确,设计计算方法滞后于工程应用等问题,对框架预应力锚杆柔性支护结构进行全面的理论分析和试验研究,将结构设计和分析方法进行综合和完善,并结合具体工程应用情况尽可能准确地确定相关设计参数,使理论计算与工程实践尽量吻合,使框架预应力锚杆柔性支护结构的设计计算更加合理、准确是工程技术人员必须面临的问题。近 20 年来,本书作者和其指导的博士、硕士开展了这方面的研究工作,重点对框架预应力锚杆柔性支护结构的计算理论进行研究,同时对预应力锚杆的作用机理、极限抗拔承载力和其他几个关键技术问



题进行研究探讨。考虑到框架预应力锚杆柔性支护结构在近年来的广泛应用,但是其计算理论的缺乏,研究工作的目标是给出更加合理、完善的设计依据和计算方法,可减少由于设计不当造成的经济损失,对于促进其在更多地区和领域的推广应用,对保证基坑开挖、公路、铁路和建筑物边坡的使用安全,更加经济合理地进行设计,具有重要的理论意义和工程实践价值。

### 1.3 柔性支挡结构的静力稳定性分析

边坡稳定性分析一直是岩土工程中的重要研究课题。多年来,许多学者都致力于这方面的研究工作,边坡稳定分析理论的内容十分丰富,公路、铁路等交通设施的建设、土坝工程、港口工程等天然资源的开发与利用以及房屋建筑和深基坑的开挖工程中都会遇到边坡稳定问题。对边坡的稳定性分析方法进行研究是边坡诸多研究方向中的一个细小分支,尽管它不能解决边坡分析与治理的全部问题,但是它在边坡的稳定性设计中占据重要位置<sup>[63]</sup>,目前的发展相对比较成熟。但是随着以岩土锚固技术为核心的新型支护结构的不断出现和计算机技术的飞速发展,传统的边坡稳定性分析方法已经受到了挑战。因为岩土锚固技术的应用大大加强了支护结构与岩土体之间的协同工作能力,改善了边坡的受力状态,此时的边坡稳定性分析问题属于岩土与结构相互交叉的问题。由于深基坑从本质上讲就是边坡,只不过由于其特定的施工和应用环境而得名,另外两者的区别还在于前者属于临时性维护结构,而后者属于永久性支护结构,在设计过程中略有区别而已,因此下面有关稳定性问题的表述都统称为边坡稳定性分析。

目前,工程技术人员主要采用的边坡稳定性分析方法是以条分法为基础的极限平衡法<sup>[29~33]</sup>、有限元单元法<sup>[34, 35]</sup>、基于塑性理论的极限分析方法<sup>[38~40]</sup>、可靠度法<sup>[36]</sup>、人工智能法<sup>[37]</sup>等。尤其是随着数值分析方法在工程领域应用技术的成熟,加之有限元在理论上的优势,利用有限元分析边坡的稳定性成为近年来研究的热点。但是,由于这种方法计算较为复杂,在有限元分析时还有很多模型参数不易确定,因此要使工程设计人员普遍掌握并熟练运用还有一定的困难,而极限平衡分析法采用的力学模型简单,可以对边坡的稳定性进行定量评价,已经被工程人员广泛采用。

极限平衡分析法是土坡稳定分析中最早采用的方法,其中条分法在工程中应用最早。1916年瑞典人彼德森(K. E. Petterson)最早提出条分法,其假定土坡稳定问题是平面应变问题,并对圆柱形滑移面上的土体划分为条块,计算中不考虑土条间的作用力,定义安全系数为滑移面上全部抗滑力矩与滑动力矩之比。之后, Fellenius (1936年)、 Bishop (1955年)<sup>[41]</sup>、Janbu (1973年)<sup>[42]</sup>、Morgenstern 和 Price (1965年)<sup>[43]</sup>、Sarma (1987年)<sup>[44]</sup>等许多学者对条分法进行了改进。其中 Bishop 重新定义安全系数为沿整个滑移面的抗剪强度和实际剪应力的比值,使得物理意义更加明确。王平等<sup>[45]</sup>根据土条间的几何关系提出了土坡稳定分析的辐向条分法,邹广电<sup>[46]</sup>根据 Bishop 法和非线性规划原理,对工程实践中应用最为广泛的圆弧滑移面法,提出了边坡稳定性分析条分法的一个全局优化算法。

严格地讲,边坡稳定分析是一个三维问题,特别是对具有复杂几何形状的情况。Stark等<sup>[47]</sup>认为,极限平衡二维分析中隐含破坏面在垂直剖面方向无穷大的假设和实际不符,