

岩土锚固·土钉·喷射混凝土

——原理、设计与应用

程良奎 李象范 编著



中国建筑工业出版社

岩土锚固·土钉·喷射混凝土 ——原理、设计与应用

程良奎 李象范 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土锚固·土钉·喷射混凝土——原理、设计与应用/
程良奎, 李象范编著. —北京: 中国建筑工业出版社,
2008

ISBN 978-7-112-10406-2

I. 岩… II. ①程…②李… III. 岩土工程-锚固
IV. TU753.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 155809 号

本书共分三篇, 第一篇主要论述了岩土锚固的作用机理、工作特性、设计计算、防腐保护、荷载传递机制、工程材料、施工工艺、试验方法、监控量测、长期性能与安全评价。还着重介绍了在国内外隧道、洞室、边坡、深基坑、混凝土坝、抗浮结构、桥梁和基础等工程中岩土锚杆(索)的设计、应用与最新发展。第二篇主要论述了土钉与复合土钉与复合土钉支护的基本概念、受力-变形性状、设计方法、稳定性验算、施工工艺、监测方法与工程应用。还着重介绍了复合土钉支护在软土基坑工程中的设计与应用。第三篇主要论述了喷射混凝土技术的作用原理、设计方法、外加剂与外掺料、基本性能、施工工艺、质量控制与检验以及在各类工程中的应用。

本书体系完整、内容新颖充实、实用性强、并有一定理论深度。本书可供水利、水电、铁道、交通、建筑、市政、地质、矿山、电力和国防等系统的工程设计、施工、管理、监理人员阅读使用, 也可供有关高等院校师生及科研单位有关专业人员参考。

* * *

责任编辑: 唐炳文

责任设计: 董建平

责任校对: 刘 钰 孟 楠

岩土锚固·土钉·喷射混凝土

——原理、设计与应用

程良奎 李象范 编著

*

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

北京密云红光制版公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 45 $\frac{3}{4}$ 字数: 1136 千字

2008 年 12 月第一版 2008 年 12 月第一次印刷

印数: 1—3500 册 定价: 98.00 元

ISBN 978-7-112-10406-2

(17330)

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)

作者简介



程良奎 江苏溧阳人, 1935 年 11 月生, 1957 年毕业于西安建筑工程学院 (现西安建筑科技大学), 曾任冶金工业部建筑研究总院副总工程师、中国岩石力学与工程学会地下工程专业委员会副主任委员、中国岩土锚固工程协会理事长、中国金属学会施工技术专业委员会主任委员、矿建专业委员会副主任委员, 现任中冶集团建筑研究总院地基与地下工程研究所顾问总工、教授级高级工程师、中国岩石力学与工程学会常务理事, 中国岩石力学与工程学会技术咨询委员会主任委员, 大连理工大学、北京科技大学、中国矿业大学 (徐州) 等校的兼职教授, 土木工程学报与岩石力学与工程学报编委。

40 多年来, 一直从事岩土加固技术与隧洞, 边坡及深基坑工程稳定性的研究开发工作。主持完成的“喷射混凝土”、“喷射混凝土锚杆支护”、“开缝式摩擦锚杆技术”、“金川不良岩层巷道变形控制方法”、“岩土预应力锚杆新技术”、“土钉墙支护技术”、“单孔复合锚固体系的理论与实践”、“可拆芯式锚索技术”、“三峡永久船闸高边坡预应力锚固技术”等 17 项富有创造性的科研成果, 分别获国家级、省部级科技进步奖与全国科学大会奖。主持制订、修订了《锚杆喷射混凝土技术规范》(GB 50086—2001)、《岩土锚杆 (索) 技术规程》(CECS 22: 2005) 等七个国家与行业标准, 主持完成了 100 多项有关矿井、隧道、地下工程、高边坡、深基坑、重力坝等大中型建设项目中的岩土加固工程的设计施工或关键技术问题的处理, 成效显著。独立或为主撰写出版了《井巷喷射混凝土支护》(1973 年)、《喷射混凝土》(1990 年)、《岩土加固实用技术》(1994 年)、《喷射混凝土与土钉墙》(1998 年)、《岩土锚固》(2003 年) 等专著。自 1966 年在《金属矿山》刊物上发表《喷射混凝土的研究和应用》一文以来, 先后在国内外发表了“喷锚支护的工作特点与作用原理”、“挤压膨胀性岩体中巷道的稳定性”、“喷锚支护监控设计及其在金川矿山巷道工程中的应用”、“单孔复合锚固体系的理论与实践”、“岩土锚固研究与新进展”、“岩土锚固工程的长期性能与安全评价”等论文 150 多篇。

作者简介



李象范 山东省桓台县人，1945年7月生，1970年7月毕业于同济大学地下建筑工程专业。任教于同济大学。现任同济大学土木工程学院教授，中国岩土锚固协会副理事长，中国建筑学会建筑施工学术委员会基坑工程专业委员会委员。

多年来从事地下建筑工程、基础工程、岩土工程的教学、科研和设计工作。先后完成“土层锚杆”、“复合土钉”、“地下工程抗浮技术措施”、“分层注浆”、“超大型圆支撑基坑工程”等多项研究工作，并多次获得科技进步奖。还先后参与过北京地铁、上海地铁、天津地铁、上海越江隧道的设计、研究工作。参与撰写的著作有《软土工程施工新技术》、《地基处理手册》、《基坑工程手册》等。公开发表了“直径210m超大圆环支撑基坑设计分析”、“软土深基坑预应力重力式围护结构设计与分析”、“松软地层中基坑工程的复合型土钉支护”、“复合型土钉墙受力变形与承载机理研究”、“上海地区基坑工程的复合土钉支护技术”等论文50余篇。

前 言

在水利、能源、交通、矿业、城市基础设施和地质灾害防治等工程建设中，有一门正在迅速发展，并已经和必将进一步发挥其巨大效能的工程技术，这就是岩土锚固、土钉和喷射混凝土技术。这些技术的共同点是，能最大限度地保护和加固岩土体，有效调用岩土体的自身强度，主动发挥岩土体的自承能力，从而达到提高施工安全和工程稳定，减少工程体积，减轻结构自重，节约工程材料，降低工程投资和加快工程建设的目的。反之，在岩土工程建设中，低估这些技术的作用，忽视这些技术的应用，或不能科学地、能动地、合理地、因地制宜地运用这些技术，就会造成严重的经济损失或增加工程安全风险。

从 1963 年至今，在过去的四十多年中，作者及冶金部建筑研究总院（现名为中冶集团建筑研究总院）、同济大学的相关专业科技人员先后在岩土锚固、土钉和喷射混凝土技术领域做了许多开拓性的工作。主持和参加了多项国家和省部级重点科研项目，取得了一批达到国际先进水平、应用量大、覆盖面广，产生巨大经济和社会效益的科技成果。有 30 余项重大成果获国家及省部级科技进步奖与全国科学大会奖，主持制订、修订了《锚杆喷射混凝土支护技术规范》（GB 50086—2001）、《岩土锚杆（索）技术规程》（CECS 22：2005）等 10 余项国家与行业标准，解决了包括三峡、奥运、金川、鞍钢、攀钢、武钢、中国银行总行、中国工商银行总行等一大批国家重大建设工程中的岩土开挖工程稳定的关键技术难题。

本书的主要内容取材于作者主持的课题组的科研成果报告与工程实践总结，同时也大量吸纳了国内外的先进科技成果和工程经验，力求为读者奉献一本体系完整，内容新颖充实，有一定理论深度和实用性强的专著。

本书第一篇主要介绍了岩土锚固的作用机理、工作特性、设计计算、防腐保护、荷载传递机制、工程材料、施工工艺、试验方法、监控量测、长期性能与安全评价，还着重介绍了在国内外隧道、洞室、边坡、深基坑、混凝土坝、抗浮结构、桥梁和基础等工程中岩土锚杆（索）的设计、应用与最新发展。第二篇主要介绍了土钉与复合土钉的基本概念、支护型式、适用条件、稳定性计算、支护设计、施工方法、力学性状、工程监测与应用。第三篇主要介绍了喷射混凝土的作用原理、设计方法、原材料及其配合比、力学性能、施工工艺、质量控制与检验以及工程应用。

本书第一、三篇由中冶集团建筑研究总院（原冶金工业部建筑研究总院）程良奎撰写，第二篇由同济大学李象范撰写。

本书内容凝聚了岩土工程领域广大科技工作者的心血和智慧。这里要特别向中冶集团建筑研究总院李成江、苏自约、张弛、庄秉文、邹贵文、冯申铎、范景伦、杨志银、胡建林、周彦清、柳建国、许建平、张培文，同济大学何文民、尹骥，长江水利委员会勘测设计研究院陈代华，中科院武汉岩土力学研究所盛谦，长江科学院韩军、朱杰兵，南京工程兵学院除水根，中铁西南科学研究院罗朝廷，中国新兴建设总公司基础工程公司朱继永，

水电七局罗建林、李正兵等同志的帮助和支持表示诚挚的感谢。

限于作者水平，书中错误与不当之处，在所难免，敬请读者不吝指正。

程良奎

于中冶集团建筑研究总院

目 录

第一篇 岩 土 锚 固

第一章 岩土锚固的基本原理、力学作用与应用领域	3
第一节 岩土锚固的原理与特点	3
第二节 岩土锚固的力学作用	4
一、抵抗倾倒	4
二、抵抗竖向位移	5
三、控制地下洞室围岩变形和防止塌落	6
四、阻止地层的剪切破坏	7
五、抵抗结构物基底的水平位移	8
六、预加固地基	10
第三节 岩土锚固的历史沿革	11
第四节 岩土锚固的应用领域	12
一、边坡稳定工程	12
二、深基坑工程与抗浮工程	13
三、抵抗倾覆的结构工程	13
四、隧洞与地下工程	13
五、冲击区的抗浮与保护	13
六、加压装置	14
七、特种结构物的锚固与稳定	14
第五节 岩土锚固的有关术语与定义	15
第二章 岩土锚固的新进展	17
第一节 应用领域与规模	17
一、边坡工程	17
二、地下工程	17
三、重力坝加高与加固工程	18
四、基坑工程	18
五、矿山巷道支护工程	19
六、抗浮工程	19
七、桥梁工程与结构抗倾工程	20
第二节 标准化建设	20
第三节 岩土锚固的力学效应研究	21

一、锚固对岩土力学性能的影响	21
二、承载拱效应	22
三、锚固对岩体应力状态与完整性的影响	23
第四节 单孔复合锚固（荷载分散型锚固）体系	24
第五节 高承载力锚杆	25
第六节 锚杆的防腐保护与耐久性	26
第七节 中空注浆型锚杆及扩体型锚杆	26
第八节 重复灌浆技术与软土锚固	27
第九节 土钉与复合土钉加固	28
第十节 锚杆的长期性能与安全评价	29
第三章 岩土锚杆的类型与工作特性	31
第一节 预应力锚杆与非预应力锚杆	31
第二节 拉力型锚杆与压力型锚杆	32
第三节 荷载集中型锚杆与荷载分散型锚杆	33
一、荷载集中型锚杆	33
二、荷载分散型锚杆	35
第四节 机械固定型锚杆与胶结料固定型锚杆	44
一、机械固定的锚杆	44
二、用胶结料固定的锚杆	44
三、用胶结料与机械锚固件共同固定的锚杆	49
第五节 扩体型锚杆	50
一、底端扩体型锚杆	50
二、多段扩体型锚杆	51
第六节 缝管锚杆与水胀式锚杆	52
一、缝管锚杆	52
二、水胀式锚杆	55
第七节 无锚头型预应力锚杆	56
一、俄罗斯 Sayane-Shushensk HPS 工程无锚头型预应力锚固	57
二、莫斯科运河船闸闸墙的无锚头型预应力锚杆锚固	58
第八节 可控的大变形锚杆	60
第九节 可拆芯式锚杆	61
第十节 中空注浆锚杆系列	62
一、普通中空锚杆	62
二、自钻式中空锚杆	63
三、涨壳式中空锚杆	64
第十一节 纤维增强塑料锚杆	65
第四章 岩土锚杆的设计	67
第一节 调查与勘察	67

一、一般调查	67
二、勘察与专项调查	67
第二节 锚杆的设计	68
一、锚杆设计的一般规定与设计流程	68
二、锚杆的配置	70
三、锚杆的安全系数	72
四、杆体设计	73
五、锚杆锚固段设计	74
六、锚杆自由段设计	79
七、注浆体强度	79
八、锚头与传力结构的设计	80
九、锚杆的防腐设计	80
十、锚杆的初始预应力	81
第三节 锚杆及构筑物的稳定性验算	81
一、单排锚杆支承时的内部稳定性验算	81
二、多排锚杆支承时的内部稳定性验算	82
 第五章 锚杆内的荷载传递及锚杆的特殊荷载问题	85
第一节 荷载从杆体传递给灌浆体的力学行为	85
第二节 荷载由灌浆体传递给地层的力学行为	88
第三节 锚杆灌浆体与岩石间的粘结	89
第四节 锚杆灌浆体与砂性土间的粘结	93
第五节 锚杆灌浆体与黏性土间的粘结	96
第六节 锚杆群	97
第七节 重复荷载与地震效应对锚杆的影响	98
一、重复荷载对锚杆的影响	98
二、承受地震效应的锚杆	100
 第六章 锚杆材料与施工	103
第一节 锚杆材料	103
一、杆体材料	103
二、水泥系灌浆材料	105
三、合成树脂粘结材料	106
四、承载体	106
五、锚头材料	106
六、防腐材料与其他材料	107
第二节 施工准备	107
一、施工前的调查	107
二、施工组织设计	108

第三节 锚杆杆体的制作和存储	110
一、钢筋锚杆杆体的制作	110
二、钢绞线、高强钢丝锚杆杆体的制作	110
三、荷载分散型锚杆杆体的制作	111
四、可重复高压灌浆型锚杆杆体的制作	112
五、锚杆杆体的存储	112
第四节 锚杆孔的钻凿	112
一、小直径浅钻孔的钻凿	112
二、大直径长锚杆孔的钻凿	113
三、扩孔钻凿方法	116
四、锚杆孔的渗透性	117
第五节 锚杆杆体的就位	117
第六节 注浆	117
一、水泥浆的成分	118
二、水泥浆的拌制	118
三、水泥浆注入锚杆孔的方法	118
第七节 锚杆的锚具	121
一、OVM 锚具	121
二、QM 锚具	125
三、LM 螺丝杆锚具	127
四、精轧螺纹钢杆体锚具	128
五、锚具质量检验	128
第八节 锚杆的张拉锁定	129
一、张拉设备	130
二、张拉方法	133
三、荷载分散型锚杆的张拉方式	134
 第七章 锚杆的腐蚀与防护	137
第一节 腐蚀原理	137
第二节 腐蚀的必要条件与腐蚀类型	139
一、腐蚀的必要条件	139
二、腐蚀的类型	140
第三节 锚杆的腐蚀破坏及其原因分析	141
一、锚杆的腐蚀破坏实例	141
二、锚杆腐蚀原因分析	141
第四节 锚杆的防护	150
一、一般要求	150
二、环境侵蚀性与锚杆的防护类型	150
三、防腐保护细则	151

第五节 锚杆防腐保护的新进展	153
第八章 锚杆试验与锚固工程的长期监测	155
第一节 锚杆试验	155
一、一般规定	155
二、基本试验（极限抗拔力试验）	155
三、验收试验	157
四、蠕变试验	157
五、疲劳试验与群锚效应试验	158
六、锚杆验收标准及不合格锚杆的处治	160
第二节 岩土锚固工程的长期监测	161
一、锚杆初始预应力随时间变化的监测	161
二、锚杆预应力变化的外部因素	164
三、测量锚杆预应力变化的仪器	165
四、锚杆预应力变化的控制方法	168
五、锚头位移及被锚固结构物的变位监测	170
六、监测信息反馈及处理	170
第九章 岩土锚固工程的长期性能与安全评价	171
第一节 岩土锚固工程的长期性能	171
第二节 提高岩土锚固长期性能的途径与方法	175
第三节 岩土锚固工程的安全评价	176
一、安全评价模式	176
二、锚固工程危险源识别	176
三、岩土锚固长期性能的监测与检测	177
四、岩土锚固工程危险度评价	179
第四节 岩土锚固工程病害处治	179
第十章 隧道及地下洞室的锚固	181
第一节 地下洞室的稳定性及作用于岩石洞室上的压力	181
第二节 锚杆加固理论	182
一、岩石梁理论	182
二、加固拱理论	183
第三节 锚杆喷射混凝土支护的工作特性与作用原理	185
一、及时性	186
二、粘结性	187
三、深入性	188
四、柔性	189
五、易应变性	190

六、密封性	191
第四节 隧道与地下洞室的锚固设计	192
一、经验法设计	192
二、分析算法设计	197
三、监控法设计	204
第五节 新奥地利隧道设计施工法	206
一、新奥法的发展与基本原则	206
二、新奥法的锚固系统分类标准图	207
第六节 大跨度、高边墙洞室锚喷支护类型与参数设计的讨论	209
第七节 矿山巷道、采场与交通隧道的锚固	210
一、矿山巷道与采场的锚固	210
二、交通隧洞的锚固	216
第八节 大型洞室的锚固实例	219
一、黄河小浪底水利枢纽主厂房的锚固	220
二、龙滩水电站地下洞室群的锚固	221
三、彭水地下电站主厂房的洞室锚固	224
四、清江水布垭地下厂房的洞室结构	226
五、三峡水电站地下厂房的洞室锚固	227
六、瑞士 Veytaux 地下电站的洞室锚固	228
七、智利 EL Toro 地下电站的洞室锚固	229
八、巴西 Paolo Alfonso-IV 电站的洞室锚固	230
九、德国 Waldeck II 电站的洞室锚固	230
第十一章 岩土边坡的锚固	232
第一节 边坡的失稳与破坏	232
一、边坡的失稳与破坏形态	232
二、边坡失稳与破坏的因素	234
第二节 边坡工程的勘察	235
一、边坡勘察	235
二、边坡岩土体力学参数	235
第三节 边坡锚固工程的设计	236
一、设计原则	237
二、边坡稳定性评价	237
三、边坡的坡率	247
四、边坡的破坏模型与锚杆的安设部位及方位	249
五、边坡稳定所需锚固力的计算	249
六、边坡锚固的传力结构	253
七、边坡锚杆的布置	255
八、边坡锚固工程设计实例	256

第四节 边坡锚固工程施工的若干关键问题	258
一、复杂地层条件下长锚杆施工	258
二、随开挖随锚固	258
三、正确处理影响岩土锚固工作性能的不良因素	259
第五节 国内边坡锚固工程实例	259
一、三峡永久船闸高边坡加固	259
二、李家峡水电站左坝肩边坡加固	268
三、三峡链子崖边坡危岩体加固	270
四、小浪底水利枢纽进水口高边坡加固	274
五、锦屏一级电站左坝肩高边坡锚固	277
六、京福国道主干线福建段高边坡锚固	277
第六节 国外边坡锚固工程实例	279
一、西班牙 EI Ataraz 拱坝附近边坡的锚固	279
二、前捷克斯洛伐克 Decin 镇 Labe 峡谷高边坡的锚固	279
三、英国 Pen—Y—Clip 隧道口边坡锚固	280
四、英国 A ₄₀₆₁ Rhigos 道路滑坡区边坡锚固	281
五、日本的边坡锚固	283
六、瑞士阿尔普纳斯 (ALPnachstaad) 附近公路路堑的锚固	283
 第十二章 深基坑挡土结构的锚固	 285
第一节 概述	285
第二节 深基坑工程锚固结构的设计与计算	285
一、设计的内容与步骤	285
二、荷载计算	286
三、支护结构的设计计算	295
四、支护结构的稳定性验算	308
第三节 妙用锚杆——处治基坑病害的主要方法	313
一、抑制基坑土钉支护的失稳与坍塌	314
二、有效控制基坑突发性位移增量	315
三、变悬臂桩为单支点锚拉桩，使病害基坑转危为安	316
四、解决护坡桩嵌固深度不够问题	317
第四节 基坑桩（墙）锚支护工程中常见的问题与对策	318
一、锚杆杆体抗拉安全度不足	318
二、对锚杆锚固段长度的偏见	318
三、相邻锚杆锚固段间距太小	319
四、凸拐角处的锚固方法不当	319
五、钻孔方法不妥	319
六、钢腰梁刚度不足	321
七、不按规范要求对锚杆进行验收试验	321

八、缺少对锚杆拉力的监测	322
第五节 国内基坑锚固工程实例	322
一、北京中银大厦基坑可拆芯式锚杆支护工程	323
二、上海太平洋饭店基坑支护工程	324
三、天津百货大楼基坑锚杆支护工程	325
四、厦门邮电大厦基坑支护工程	326
五、北京 LG 大厦基坑工程	328
六、北京奥林匹克公园中心区地下商业建筑及下沉广场基坑工程	330
七、台湾桃园都市生活大厦基坑工程	330
第六节 国外基坑锚固工程实例	331
第十三章 混凝土坝的锚固	335
第一节 混凝土坝的锚固设计	335
第二节 用基岩锚固技术改建混凝土坝	337
一、阿尔及利亚舍尔法重力坝改建	337
二、南非 steenbras 坝的改建	338
三、英国 Argal 坝的加高	338
四、奥地利 Spullersee 坝的加高	339
五、前捷克斯洛伐克 Bystricka 坝的改建	339
六、澳大利亚巴林贾克 (Burrinjack) 坝的改建	339
七、法国 Joux 坝与埃塞俄比亚 Gafarsa 坝的改建	341
八、德国用 4500kN 岩锚改善 EDER 重力坝的总体稳定性	341
九、苏格兰玛拉多奇坝用 11000kN 预应力锚杆加固	344
第三节 用锚固技术加固混凝土坝	347
一、安徽梅山混凝土坝坝基加固	347
二、湖南双牌混凝土坝坝基加固	348
三、陕西石泉混凝土坝加固	348
四、吉林丰满混凝土坝加固	350
五、潘家口坝体加固	351
六、辽宁蓓窝水库混凝土坝加固	351
第四节 用基岩锚固技术建造新坝	353
一、石家庄市峡石沟拦挡坝	353
二、巴西 Ernestina 坝	353
三、苏格兰 Allt-na-Lairige 坝	353
四、澳大利亚 Catagunya 坝	356
五、德国 Rauschenbach 重力坝	356
六、法国 St. Michel 连拱坝	356
七、法国 Mont-Larron 连拱坝	357
八、澳大利亚 Meadow-Bank 坝	358

九、马来西亚穆达坝	358
第十四章 抗浮结构的锚固	359
第一节 一般低洼结构物的抗浮锚固	359
一、国内低洼结构物抗浮锚固工程	359
二、国外低洼结构物的抗浮锚固工程	366
第二节 消力池的锚固	369
第三节 干船坞的锚固	371
第十五章 基础与桥梁结构的锚固	375
第一节 基础的锚固	375
一、基础下面地层的预先固结	375
二、承受切向力的基础	376
三、承受倾覆力矩的基础	378
四、承受拉力的锚杆与锚固块	381
第二节 桥梁结构的锚固	387
第十六章 国内外岩土锚杆规范的现状与特点	391
第一节 概述	391
第二节 中国岩土锚杆规范	392
一、锚杆喷射混凝土支护技术规范 (GB 50086—2001)	392
二、岩土锚杆 (索) 技术规程 (CECS 22 : 2005)	393
第三节 欧洲锚杆规范	396
一、英国地锚规范 BS 8081 : 1989	396
二、德国 (原联邦德国) DIN4125 锚杆规范	398
三、奥地利 B-4455 锚杆规范	401
四、瑞士锚杆标准 SN533—191	403
第四节 美国预应力岩土锚杆的建议	405
第五节 日本地层锚杆设计施工规程	407
第一篇 参考文献	409
第二篇 土钉支护及复合型土钉支护	
第十七章 土钉支护的概念和发展	417
第一节 复合型土钉支护的发展	417
第二节 复合型土钉支护的概念	419
一、土方开挖	421
二、土钉施工	421
三、土钉与土层锚杆比较	422
四、复合土钉支护与加筋土挡墙的比较	424

第十八章 复合土钉支护的形式和应用	426
第一节 复合土钉支护形式	426
一、防渗帷幕+土钉支护	426
二、微型桩+土钉支护	427
三、超前支护+预应力锚杆+土钉支护	427
四、桩-锚结构+土钉支护	427
五、桩-撑结构+土钉支护	428
第二节 土钉及复合土钉支护应用	429
一、土钉支护的优点	431
二、土钉支护的局限性	432
三、土钉支护的工程应用	433
四、土钉支护适应土层	434
五、土钉支护不适应土层	434
六、复合型土钉支护适应和不适应土层	435
第三节 钉-锚复合型式基坑支护	435
一、钉-锚复合型式之一：放坡土钉与预应力土层锚杆的结合	435
二、钉-锚复合型式之二：浅部放坡施作土钉，深部采用桩-锚结构	439
第十九章 复合型土钉支护受力-变形性状	442
一、土钉支护受力-变形过程	442
二、土钉支护基坑边坡变形-破坏过程表明土钉支护边坡的人工构造边坡的 属性	443
三、土钉支护边坡构不成重力坝体的破坏模式	445
四、土钉-土体相互作用	446
五、土钉-面层-土层相互作用	447
第二十章 复合型土钉支护设计	448
第一节 土钉支护基坑设计的准备工作	448
一、土钉支护基坑设计所需要的资料	448
二、土钉支护设计准则	449
三、设计方法选择	450
第二节 复合土钉支护设计步骤	453
一、超前支护的形式、排数和插入深度	453
二、土钉的形式和布置	457
第二十一章 土钉支护稳定性验算	461
第一节 《建筑基坑支护技术规程》的整体稳定分析方法	461
第二节 国外常用的稳定分析方法	462
一、德国 Stocker 等提出的极限分析方法	462