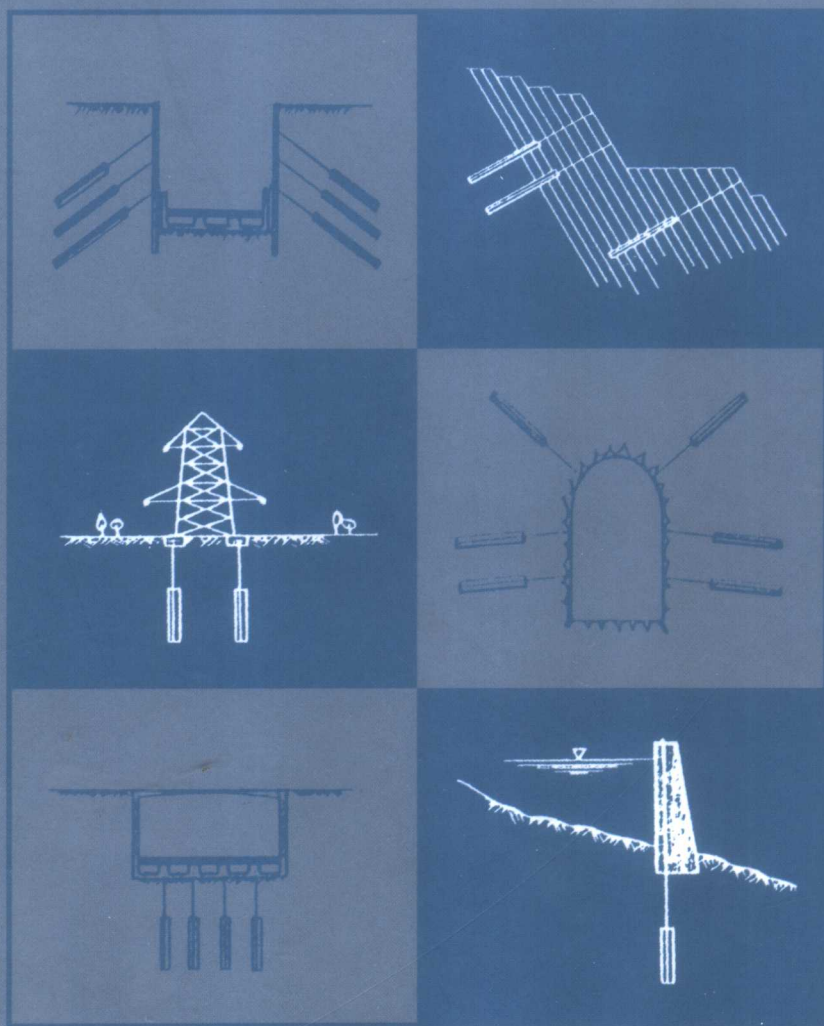


岩土锚固

程良奎 范景伦 韩军 许建平 著

YANTUMAOGU



YANTUMAOGU

中国建筑工业出版社

岩 土 锚 固

程良奎 范景伦 著
韩 军 许建平

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土锚固/程良奎等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2002

ISBN 7-112-05383-8

I. 岩... II. 程... III. 岩土工程-锚固 IV. TU472

中国版本图书馆CIP数据核字 (2002) 第086052号

岩 土 锚 固

程良奎 范景伦 著
韩 军 许建平

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24½ 字数: 607 千字

2003 年 1 月第一版 2003 年 1 月第一次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 46.00 元

ISBN 7-112-05383-8

TU·4800 (10997)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书系统地论述了岩土锚固的作用机理、设计计算、防腐保护、工程材料、施工工艺、试验方法、监控量测和长期性能。特别是深入地论述了预应力锚杆与非预应力锚杆、拉力型锚杆与压力型锚杆、单孔复合锚固与单孔单一锚固、缝管式锚杆与水胀式锚杆、自钻式锚杆与中孔式锚杆等各类锚杆的工作特性与适用条件；不同条件下岩土锚杆的设计计算与稳定性分析；锚杆的粘结应力分布与荷载传递方式；锚杆腐蚀的影响因素及防止腐蚀的对策，锚杆的试验方法及验收标准。

本书全面反映了岩土锚固技术在国内外隧道、洞室、矿井、边坡、深基坑、混凝土坝、抗浮结构、基础及桥梁等工程中的最新发展和应用实践，对我国三峡永久船闸高边坡加固、小浪底地下厂房支护、李家峡、石泉大坝加固和中国银行总行深基坑支护等大型工程采用预应力锚固技术的设计、施工、监测经验作了全面总结和深刻剖析，着重介绍了澳大利亚、德国、英国、瑞士、日本、奥地利、俄罗斯、苏格兰等国在重力坝、大型地下厂房、污水处理厂、道路边坡和建筑基础等工程中应用的岩石锚固先进技术。

本书还介绍了中国、德国、英国、瑞士、美国、日本及国际预应力混凝土协会颁发的岩土锚杆规范的主要内容与特点。

本书体系完整、内容新颖充实，实用性强，并有一定的理论深度。本书可供水利、水电、铁道、公路、矿山、建筑、港工、地质、军工及桥梁等系统的工程设计、施工、监理人员阅读使用，也可供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

310-101

序 言

众所周知，岩土锚固是岩土工程领域中的重要分支，近年来其发展尤为喜人，前景十分广阔。

岩土锚固的生命力在于它能充分发挥岩土材料自身固有的能量，最大限度地调动岩土介质的强度和潜力，主动加强岩土体的自承和自稳能力，控制工程有害变形的发展，能把结构物与岩土体紧紧地连锁在一起，将结构物的拉应力有效地传递给岩土体，能确保岩土工程的施工安全和长期稳定。在许多困难条件下，岩土锚固技术几乎成为解决复杂岩土工程问题无法替代的最经济、最有效的方法。因此，多年来一直受到岩土工程界的高度重视，并在我国的工程建设中产生了巨大的经济效益和社会效益。

近四十年来，作者及作者所领导的科研组，一直致力于岩土锚固、喷射混凝土和土钉支护的科学研究、技术开发和工程实践，长期工作在矿井、隧道、边坡和建筑基坑工程现场，取得了一批创造性的科研成果，解决了一些重大建设工程中遇到的十分复杂的岩土工程加固难题，主持制定了国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001)和中国工程建设标准化协会标准《土层锚杆设计施工规范》(CECS22:90)，近年来则几乎不停歇地奔波于三峡、龙滩、水布垭等水利建设工地和京福等高速公路工程现场。本书的主要内容集中反映了作者在岩土锚固领域辛勤耕耘、努力开拓所取得的科研成果及实践经验。

改造岩土、加固岩土，挑战岩土，做一名永不褪色的挖掘岩土潜能的斗士，是作者毕生的追求，也是作者力量的源泉。

岩土锚固工程技术是十分复杂的，它涉及地质、力学、结构、材料、施工、环保等多个专业与学科，是一门综合性、边缘性和实践性均较强的工程技术。

本书较全面深入地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、监控量测和长期性能，特别是以较大篇幅介绍了岩土锚固技术在国内外隧道、洞室、边坡、基坑、混凝土坝、抗浮结构、桥梁和基础等工程中的最新发展和应用实践，还介绍了中国、德国、英国、瑞士、奥地利、美国、日本和国际预应力混凝土协会所颁发的岩土锚杆规范的主要内容与特点，旨在为广大读者奉献一本体系完整、内容新颖充实、实用性强并有一定理论深度的岩土锚固技术专著，

以推动岩土锚固技术的应用与发展。

本书一、二、三、四、五、六、八、十一、十五、十六、十七章由程良奎撰写；七、九、十章由范景伦撰写；十二章由韩军、程良奎、盛谦撰写；十三章由许建平撰写；十四章由韩军撰写；十八章由程良奎、韩军撰写。

限于作者水平，书中错误或不当之处，一定在所难免，敬请读者不吝指正。

本书的撰写工作，得到了冶金部建筑研究总院庄秉文、苏自约、邹贵文、冯申铎、张弛、王宪章、胡建林、杨志银、李成江、周彦清、钟映东、张智浩等同志的帮助与支持，表示由衷的感谢。

程良奎

2002年9月

目 录

第一章 岩土锚固的特点	
与新进展	1
第一节 岩土锚固的特点	1
第二节 岩土锚固的新进展	1
第三节 岩土锚固的应用领域	11
第二章 岩土锚固的基本原理	
与力学作用	14
第一节 岩土锚固的基本原理	14
第二节 岩土锚固的力学作用	15
第三章 岩土锚杆的类型	
与工作特征	24
第一节 预应力与非预应力锚杆	24
第二节 拉力型与压力型锚杆	25
第三节 单孔单一锚固与单孔 复合锚固	26
第四节 锚杆的机械固定、胶结料固定 和扩张基底固定	34
第五节 缝管锚杆与水胀式锚杆	41
第六节 自钻式锚杆与中空锚杆	44
第四章 锚杆的埋设深度	48
第一节 在坚硬岩石中的 锚固深度	48
第二节 在破碎或软弱岩石中 的锚固深度	49
第三节 在非粘性土中的 锚固深度	51
第四节 在粘性土中的锚固深度	53
第五章 岩土锚杆的设计	56
第一节 计划与调查	56
第二节 锚杆的设计	57
第三节 锚杆及构筑物的 稳定性验算	71
第六章 锚杆内的荷载传递 及有关问题	75
第一节 荷载从杆体传递给灌 浆体的力学行为	75
第二节 岩石中的锚杆	79
第三节 砂性土中的锚杆	84
第四节 粘性土中的锚杆	86
第五节 锚杆群	87
第六节 重复荷载与地震效应 对锚杆的影响	89
第七章 锚杆的施工	92
第一节 施工准备	92
第二节 锚杆杆体材料	94
第三节 锚杆杆体制作	103
第四节 锚杆钻孔	108
第五节 锚杆注浆	118
第六节 锚杆的锚具	121
第七节 锚杆张拉	129
第八节 锚杆传力结构	139
第九节 锚杆工程质量与验收	140
第八章 锚杆的腐蚀与防护	142
第一节 腐蚀原理	142
第二节 腐蚀的必要条件 与腐蚀类型	144
第三节 锚杆的腐蚀破坏 及其原因分析	146
第四节 锚杆的防护	147
第九章 锚杆的试验	151
第一节 基本试验	151
第二节 验收试验	153
第三节 蠕变试验	153
第四节 锚杆验收标准	154
第十章 锚杆的长期观测	157
第一节 锚杆预应力随 时间的变化	157
第二节 锚杆预应力变化的 外部因素	159
第三节 测量锚杆预应力变 化的仪器	161

第四节	锚杆预应力变化的 控制方法	162
第十一章	隧道及地下洞室的锚固	164
第一节	岩石洞室的稳定性及作用于 岩石洞室上的压力	164
第二节	锚杆加固理论	165
第三节	地下洞室的锚固设计	173
第四节	新奥地利隧道设计施工法	187
第五节	锚杆在隧道与地下洞室 工程中的应用	190
第十二章	岩土边坡的锚固	207
第一节	边坡稳定性分析方法	208
第二节	边坡稳定所需锚 固力的计算	213
第三节	边坡锚固设计与施工中 的若干问题	218
第四节	国内边坡锚固工程实例	221
第五节	国外边坡锚固工程实例	247
第十三章	深基坑挡土结构的锚固	255
第一节	概述	255
第二节	深基坑工程锚固结构的种类	255
第三节	深基坑工程锚固结构的 设计与计算	255
第四节	支护结构的稳定性验算	292
第五节	深基坑锚固技术的 工程应用	297
第十四章	混凝土坝的锚固	309

第一节	混凝土坝的锚固设计	309
第二节	用基岩锚固技术改 建混凝土坝	311
第三节	用锚固技术加固大坝	321
第四节	用基岩锚固技术建造新坝	327
第十五章	抗浮结构的锚固	331
第一节	一般低洼结构物的抗浮锚固	331
第二节	消力池的锚固	339
第三节	干船坞的锚固	342
第十六章	基础的锚固	346
第一节	基础下面地层的预先固结	346
第二节	承受切向力的基础	347
第三节	承受倾覆力矩的基础	349
第四节	承受拉力的锚杆与锚固块	352
第十七章	桥梁结构的锚固	359
第十八章	国内外岩土锚杆规范的 现状与特点	363
第一节	概述	363
第二节	中国的岩土锚杆规范	364
第三节	欧洲国家的地层锚杆规范	367
第四节	美国的岩土预应力 锚杆规范	373
第五节	日本地层锚杆设计 及施工规程	375
第六节	国际预应力协会的预 应力锚杆规范	376
参考文献		378

第一章 岩土锚固的特点与新进展

第一节 岩土锚固的特点

岩土锚固是通过埋设在地层中的锚杆，将结构物与地层紧紧地联锁在一起，依赖锚杆与周围地层的抗剪强度传递结构物的拉力或使地层自身得到加固，以保持结构物和岩土体的稳定。

与完全依靠自身的强度、重力而使结构物保持稳定的传统方法相比较，岩土锚固尤其是预加应力的岩土锚固具有许多鲜明的特点。

1. 能在地层开挖后，立即提供支护抗力，有利于保护地层的固有强度，阻止地层的进一步扰动，控制地层变形的发展，提高施工过程的安全性。

2. 提高地层软弱结构面、潜在滑移面的抗剪强度，改善地层的其他力学性能。

3. 改善岩土体的应力状态，使其向有利于稳定的方向转化。

4. 锚杆的作用部位、方向、结构参数、密度和施作时机可以根据需要方便地设定和调整，能以最小的支护抗力，获得最佳的稳定效果。

5. 将结构物——地层紧密地连锁在一起，形成共同工作的体系。

6. 伴随着结构物体积的减小，能显著节约工程材料，有效地提高土地的利用率，经济效益十分显著。

7. 对预防、整治滑坡，加固、抢修出现病害的结构物具有独特的功效，有利于保障人民生命财产安全。

第二节 岩土锚固的新进展

早在 1890 年，北威尔士的煤矿加固工程，最先出现用钢筋加固岩层，1905 年美国矿山中也出现了类似的钢筋加固工程。1918 年，波兰将岩石锚杆用于 Mir 矿。1934 年在阿尔及利亚切尔夫斯坝加高工程中，首先采用承载力为 10000kN 的预应力锚杆来保持加高后坝体的稳定。在稍后的时间里，印度的坦沙坝、南非的斯登布拉斯坝、英国的亚格尔坝和奥地利的斯布列希坝也同样采用预应力锚杆加固。1957 年前德国 Bauer 公司采用土层锚杆。

20 世纪 60 年代，前捷克斯洛伐克的 Lipno 电站主厂房（宽为 32m）、前德国的 Waldesk II 地下电站主厂房（宽 33.4m）等大型地下洞室采用高预应力长锚杆和低预应力短锚杆（张拉锚杆）相结合的支护形式。中国的矿山巷道、铁路隧洞和电站地下厂房锚杆支护的应用得以迅速发展。1964 年安徽梅山水库采用设计承载力为 2400 ~ 3000kN 的锚杆加固坝基。

20 世纪 70 年代，英国在普莱姆斯的核潜艇综合基地干船坞的改建中，广泛应用地锚以抵抗地下水的上浮力。纽约世界贸易中心深开挖工程采用锚固技术，长 950m、厚 0.9m

的地下连续墙,穿过有机质粉土、砂和硬土层直达基岩,开挖从地面以下到21m深,由6排锚杆背拉。锚杆倾角为 45° ,工作荷载为3000kN。法国、瑞士、前德国、前捷克斯洛伐克、澳大利亚先后颁布了地层锚杆技术规范。之后,瑞士、法国、前捷克斯洛伐克、澳大利亚、意大利、英国、巴西、美国、日本等国广泛采用岩土锚杆技术维护边坡稳定。

进入20世纪80年代,英国、日本等国研究开发了一种新型锚固技术——单孔复合锚固,改善了锚杆的传力机制,能大大提高锚杆的承载力和耐久性。英国采用单孔复合锚固技术在软土中使锚杆承载力达到1337kN。1989年,澳大利亚在Warragamba重力坝加固工程中,采用由65根直径为15.2mm的钢绞线组成的锚杆,极限承载力达16500kN。在此期间,中国北京的京城大厦、王府饭店、上海太平洋饭店等大型基坑工程采用预应力土层锚杆背拉桩墙结构,取得良好效果。奥地利、英国、美国、日本、中国和国际预应力协会相继制定了地层锚杆技术规范。

20世纪90年代以来,国内外岩土锚固技术无论在理论研究、技术创新或工程应用方面,都取得了飞速的发展。近二十年来岩土锚固的主要成就和最新发展集中地表现在以下几方面。

一、应用领域和规模不断扩大,展示了广阔的发展前景

岩土锚固技术除在地下工程、边坡工程、结构抗浮工程、深基坑工程中继续保持着良好的发展势态外,重力坝加固工程、桥梁工程以及抗倾覆、抗地震工程中的地层锚固则有着长足的进展。如前德国采用104根长75m,设计承载力为4500kN的预应力锚杆加固了1908~1914年建成的47m高的Eder混凝土重力坝。澳大利亚从1992年至1995年先后对Nepean、Captains Flat、Burrinjuck、Lyll等4座混凝土重力坝采用预应力锚杆进行加固,其中Burrinjuck坝高79m,采用由65根直径为15.2mm钢绞线组成的预应力锚杆(索)进行加固,锚杆的钻孔直径为315mm,锚杆的极限承载力达16250kN。澳大利亚悉尼通往Glebe岛的钢索斜拉桥同样采用高承载力的预应力锚杆(索)将基础桩与下卧的砂岩层锚固起来,以承受大的上举力。每根锚杆由64根直径为15.2mm钢绞线组成,锚孔直径310mm,锚杆长40~46m。极限承载力为16700kN,共用22根预应力锚杆。日本位于和哥山景县田边市的一座朝海的高层建筑,为防止建筑物在地震或台风期间倒塌,采用了252根垂直锚杆,锚杆嵌入砂岩层7.5m,自由段长10.4~12.1m,锚杆安装初始拉力值为1.45MN,随着房屋施工的进行,地基被压实,建筑荷载增加,地锚拉力缓慢减小,当施工结束后,地锚拉力稳定在1.26MN,大于地锚的设计拉力1.18MN。地锚锚固后的1200天和1321天,先后承受了台风和地震的影响,但测得的锚杆拉力及锚杆附近的地层位移,几乎无变化。

我国岩土锚固的发展速度也是特别令人瞩目的。从1993年至1999年,据初步统计,仅边坡工程与深基坑工程,锚杆的年用量约为3000~3500km。部分岩土锚固工程实例见表1-1。举世瞩目的三峡水利枢纽工程,长1607m的船闸边坡处于风化程度不等的闪长花岗岩中,采用4000余根长25~61m设计承载力为3000kN(部分为1000kN)的预应力锚杆和近10万根长8~14m的高强锚杆作系统加固或局部加固(图1-1),它对阻止不稳定块体的塌滑,改善边坡的应力状态,抑制塑性区的扩展,提高边坡的整体稳定性发挥了重要作用。

小浪底水利枢纽工程主厂房宽26.2m,长251.5m,最大高度61.44m,其顶拱采用设计拉力值为1500kN、长25m、间距 $4.5\text{m} \times 6.0\text{m}$ 的预应力锚杆与长6~8m、间距 $3.0\text{m} \times$

3.0m 的系统张拉锚杆加固，取得良好效果。

岩土锚固工程实例 表 1-1

工程名称	工程用途	锚杆类型	锚杆承载力 (kN)	锚杆钢绞线 (根/直径)	最大钻孔直径 (mm)
三峡水利枢纽	边坡稳定	拉力型	3000	19/15.2mm	165 ~ 176
李家峡水电站	边坡稳定	拉力型	3000		
李家峡水电站	重力坝加固	拉力型	10000	55/15.2mm	256
小浪底水利枢纽	边坡稳定	拉力型	3000	19/15.2mm	220
二滩水电站	地下厂房	拉力型	1750		
石泉水电站	重力坝加固	拉力型	{ 6000 8000	33/15.2mm 43/15.2mm	240 300
丰满水电站	重力坝加固	拉力型	6000		
中国银行总行办公楼	深基坑支挡	拉力型 压力分散型	800	6/15.2mm 8/12.7mm	133
北京京城大厦	深基坑支挡	拉力型	1300	9/15.2mm	150
首都机场扩建工程	结构抗浮	压力分散型	2200	14/15.2mm	200
梅山水库	重力坝加固	拉力型	3200	165/φ5 (钢丝)	
小浪底水利枢纽	地下厂房	拉力型	1500		150
漫湾水电站	边坡稳定	拉力型	3000		

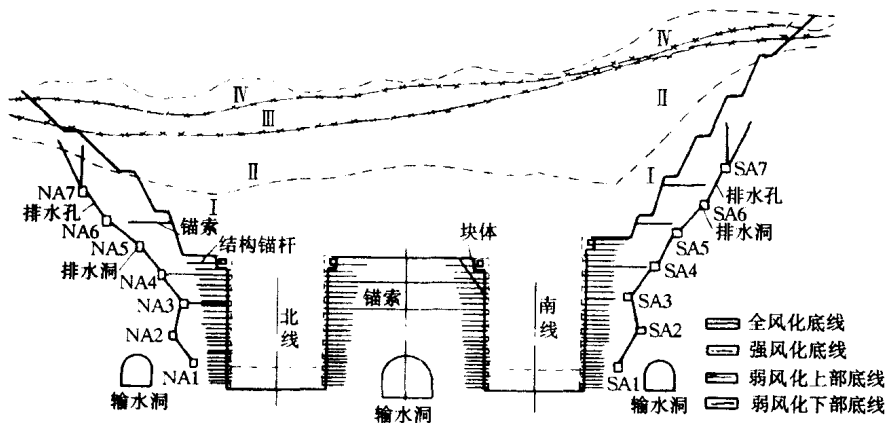


图 1-1 三峡永久船闸高边坡锚固示意图

北京中国银行大厦基坑开挖深 21.5 ~ 24.5m。穿越的地层为人工堆积层、粉质粘土、细、中砂和砂卵石层。由 3 ~ 4 排预应力锚杆背拉厚 80cm 地下连续墙作支挡结构。共采用设计承载力为 800kN 的锚杆 1300 余根，成功地维护了基坑的稳定。基坑周边的最大位移量仅为 30mm。该基坑东侧的 337 根预应力锚杆系压力分散型，在其使用功能完成后，按要求全部实现了抽芯拆除技术，为日后顺利地建造地下商场创造了良好条件。

首都机场扩建工程的地下车库，为抵抗地下水的上扬力，采用了 1000 多根设计承载力大于 2000kN 的压力分散型锚杆（图 1-2），可减小地下室底板厚度 5 ~ 6m，经济效果十分显著。

二、标准化建设日趋完善

20 世纪 70 年代以后，由于岩土锚杆的迅速发展和广泛应用，前德国、奥地利、瑞士、英国、美国、中国香港特别行政区、国际预应力混凝土协会（FIP）、澳大利亚、前捷

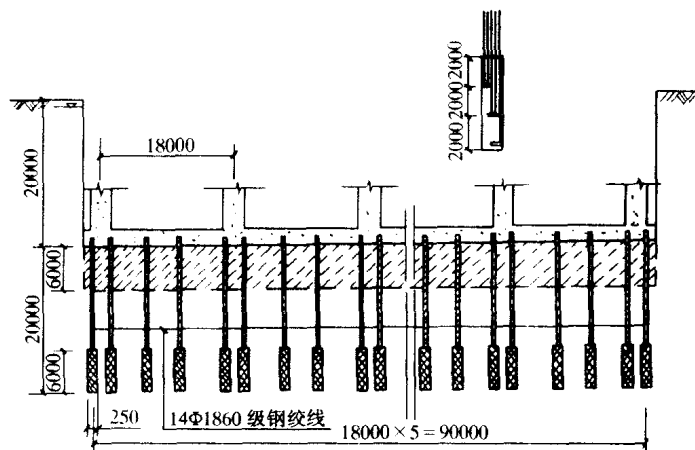


图 1-2 首都机场地下车库抗浮锚杆 (单位: mm)

克斯洛伐克、日本、中国等许多国家、地区或机构先后制定了锚杆规范与推荐性标准,从而使岩土锚固的应用沿着经济合理、技术先进、安全可靠的轨道发展。

进入 90 年代,美国、FIP 和中国对地层锚杆规范进行了修订,欧洲各国还制定了欧洲的地层锚杆规范。

国内外的地层锚杆规范一般都对锚杆的适用范围、定义、设计、材料、防腐、施工、试验等项作了明确规定。规范对锚杆服务年限在 2 年以下的定为临时锚杆,服务年限 2 年以上的定为永久锚杆。永久锚杆或临时锚杆采用不同的安全系数(锚杆极限荷载与设计荷载的比值),我国颁发的国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB50086—2001)对锚杆锚固体设计的最小安全系数的规定见表 1-2。这与世界多数国家锚杆标准对锚杆安全系数的取值是较接近的。

锚杆锚固体的安全系数

表 1-2

锚杆破坏后危害程度	安全系数	
	临时锚杆	永久锚杆
危害轻微,不会构成公共安全问题	1.4	1.8
危害较大,但公共安全无问题	1.6	2.0
危害大、会出现公共安全问题	1.8	2.2

注:永久锚杆预应力筋的设计安全系数为 1.8。

国外锚杆标准对锚杆的防腐都给以高度重视。如德国 DIN4125 锚杆规范规定,永久锚杆的防腐必须特别完善,并对下述防腐事项作了明确的规定,即:防腐材料的耐久性;施工前防腐材料的确认;施工中防腐材料的保护;锚杆头部的完全防腐;低强度钢材不做防腐时的最小截面;强腐蚀环境筋材应采用多层防腐。1996 年美国后张预应力混凝土学会(FTI)修订的“岩层与土体预应力锚杆的建议”中,对锚杆防腐蚀保护作了深入全面的规定,内容包括设计因素(使用寿命、环境的侵蚀性、地层电阻率、pH 值、地层与地下水的化学特性、地层与地下水的物理特性、潜在的杂散电流源、破坏后果等),保护要求,防腐类型选定原则和防腐蚀保护细则等。

锚杆试验也是各国锚杆规范中必不可少的。一般均规定应做基本试验(性能试验)、验收试验及徐变试验。新修订的《美国岩层和土体预应力锚杆规范》(FTI)规定锚杆验收

合格的标准应满足徐变、位移、锁定荷载三组验收标准。

此外,德国、奥地利的锚杆规范还规定:在反复荷载(交通荷载、风荷载等)作用下,锚杆所受的变动荷载不得超过锚杆设计锚固力的 20%,以控制锚杆在反复荷载作用下引起的附加位移量。

三、岩土锚固效应与荷载传递方式的研究取得可喜进展

近 20 年来,围绕岩石锚固效应的研究,国内有关人士进行了许多研究,取得了不少有价值的成果。

中科院岩土所朱维申等人曾进行了不同锚固方案的模型试验。模型材料选用了四种不同粒径的建筑砂,胶结剂采用白乳胶,锚杆用竹纤维制得。在试验中分别制作了圆柱形、矩柱形试件,进行了单轴、双轴及三轴压缩试验以及循环荷载试验和巴西劈裂法试验等,获得了以下试验结果。

(1) 加锚比无锚情况单轴压缩时材料峰值提高约 17%,残余强度提高了一倍,变形能力显著增加,抗拉强度亦提高了一倍。对双轴受力,其峰值强度对不同情况可提高 50%~100% 或更多,当锚固密度相当大时,可提高 3 倍强度而无扩容现象。无锚和有锚条件下材料的劈裂抗拉试验及循环荷载试验结果见图 1-3 和图 1-4。

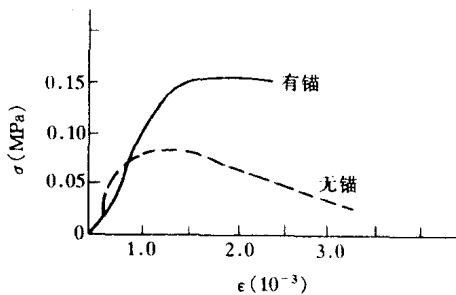


图 1-3 劈裂法对比试验

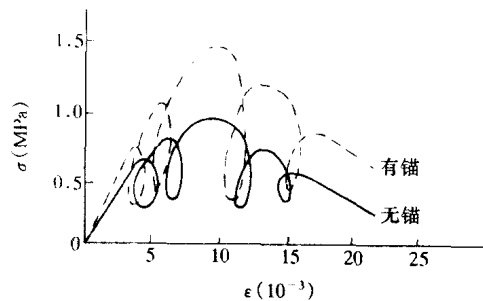


图 1-4 循环荷载对比试验

(2) 平面应变条件下试件强度除与锚固密度相关外,还受锚固角、锚固型式、锚杆材料的抗剪强度及侧向刚度的强烈影响。

(3) 倾斜交叉布置锚杆对提高峰值强度及控制岩体扩容作用显著,倾角以与壁面成 65°左右效果最好,但此种锚固类型要求锚杆有较大的侧向刚度。

(4) 全长胶结锚与端锚相比,虽对峰值强度影响不大,但体变曲线不同,前者扩容开始得晚对抑制扩容较有效,且峰值后软化现象不明显。而端锚类型则有软化现象,后期强度较低。

国内许多单位进行了岩石锚固效应的非线性有限元分析。朱维申等人设岩洞断面为圆形,采用平面应变问题分析,当无限远处作用有均匀应力场 $\sigma_1^0 = \sigma_2^0 = -20\text{MPa}$,给出了三种不同情况下洞周的最大位移值(表 1-3)和洞周破损区的范围(图 1-5)。由表 1-3 和图 1-5 可以看出,在有锚固条件下,无论对减小洞周位移或减小破损区范围均有显著效果,尤以倾斜交叉的锚固效果最佳。

在岩石锚固效应的室内大比例试验方面,冶金部建筑研究总院程良奎、庄秉文等人于 1979 年完成了锚杆加固拱的试验。该试验用 34 块不规则的混凝土块模拟碎裂结构的岩石拱,它借助拱端的约束作用,具有很低的承载力,但当用 10 根 $\phi 8\text{mm}$ 的灌浆锚杆加固后,

块石拱的承载力提高了 6.0 倍, 50kN 荷载作用时, 拱中挠度仅为未用锚杆加固的 13.3%。锚杆加固拱的破坏, 首先在拱的内表面两根锚杆间被裂隙交割的混凝土块由于裂隙面张开而出现掉落, 随着荷载的增加, 掉落处上方的混凝土块被逐步压碎, 导致整体破坏。破坏时没有发生锚杆被拔出或拉断、剪断现象, 而且锚杆仍与周围的混凝土块牢固地连接着。这些现象表明, 锚杆是被它穿过的岩块锚固在一起, 提高了岩石的抗剪强度和整体性, 并保持了锚杆间岩块的镶嵌和咬合效应, 从而限制了岩块的松动和掉落。

洞周位移 ($\sigma_1^0 = \sigma_2^0$ 情况)

表 1-3

参 数	无 锚	法向锚	斜交锚
$U_{\max}$ (cm)	1.8	1.11	0.84
破损单元数	24	16	8

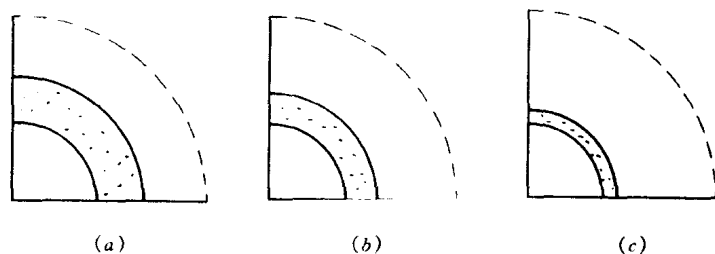


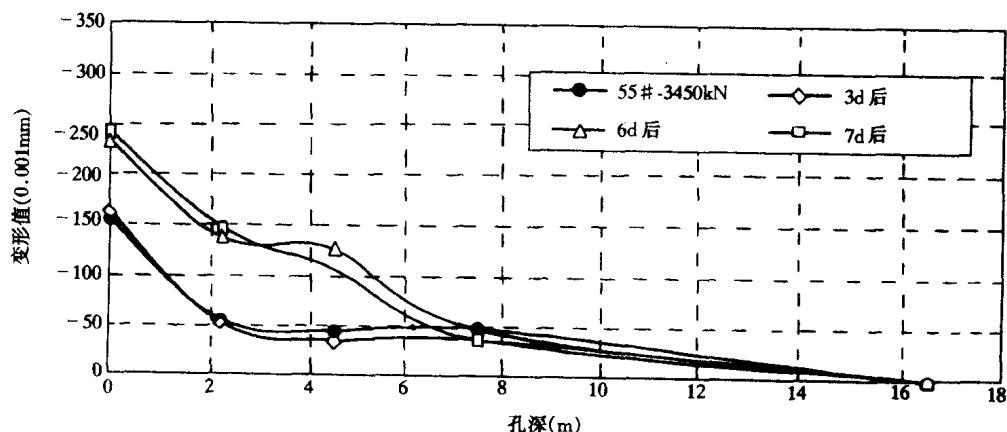
图 1-5 不同情况下洞周破损区分布

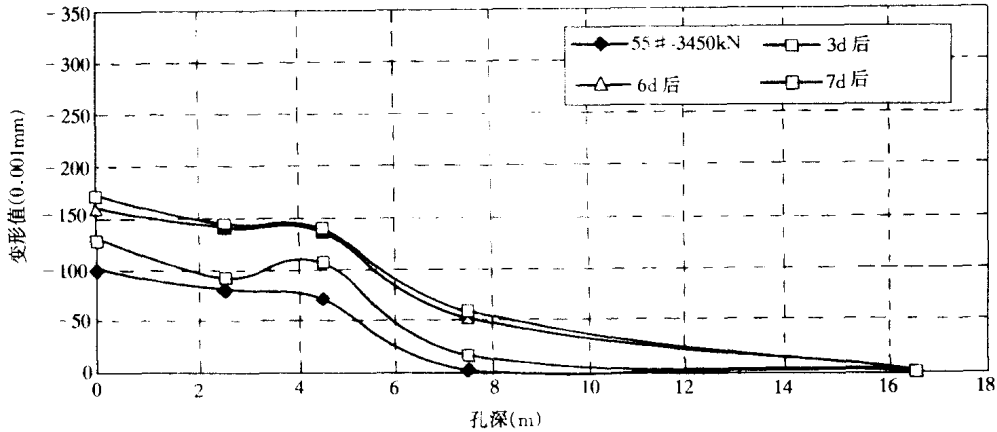
(a) 无锚; (b) 法向锚; (c) 斜交锚

近年来, 冶金部建筑研究总院与长江科学院紧密结合三峡永久船闸高边坡预应力锚固工程, 采用多点位移计、声波、钻孔弹模等综合测试方法, 研究了高承载力 (3000kN) 预应力锚索对中微风化花岗岩边坡的开挖损伤区的锚固效应。测试结果表明:

(1) 高承载力锚索作用后能在锚固作用点周围形成一个半径 2.0m、深 8.0m 的压应力区 (图 1-6 和图 1-7), 当锚索以群体工作时, 锚索的压应力区互相叠合, 能组合成受压的承载岩石墙, 使边坡的稳定性得到明显改善。

(2) 3000kN 锚固力作用后, 在离坡面 4.0m 范围内岩体的波速一般提高 10% 以上, 岩体波速最大提高率为 48.34%, 约提高 2000m/s, 振幅也有明显提高, 这表明坡体一定范

图 1-6 D_1 孔张拉前后轴向压缩应变曲线


 图 1-7 D_3 孔张拉前后轴向压缩应变曲线

围内的岩体完整性有明显提高。

(3) 3000kN 锚索张拉锁定后, 离坡面 4m 范围内的岩体弹模平均上升 4GPa 左右, 约提高 20%。灌浆以后, 岩体弹模进一步提高, 约为无锚固时的 1.3 倍 (图 1-8)。

在锚杆的荷载传递及分布性态方面, 英国的 R. B. Weerasighe、G. S. Littlejohn、R. I. Woods, 我国冶金部建筑研究总院的程良奎、胡建林, 89002 部队的顾金才、明治清等人先后采用试验和现场试验等方法, 论证了在张拉荷载作用下, 锚杆锚固段长度内的轴力及杆体与注浆体或注浆体与孔壁间的粘结应力分布是极不均匀的。其中某些试验还发现, 锚杆的粘结应力峰值逐步向锚杆底端转移的规律。据此, 英国的 A. D. Barley 和我国的程良奎等人先后提出在锚杆承载力计算公式中, 应引入固定长度有效因子的概念, 即将原锚杆承载力计算公式修正为:

$$P = \pi \cdot D \cdot L \cdot \psi \cdot q_s \quad (1-1)$$

式中 P ——锚杆极限承载力;

D ——锚杆锚固体直径;

L ——锚杆锚固体长度;

ψ ——锚杆锚固长度有效因子;

q_s ——杆体与灌浆体或灌浆体与孔壁间的粘结强度。

四、单孔复合锚固改善了锚杆的传力机制

传统的岩土锚固方法, 即集中拉力形锚杆在其受荷时, 不能将荷载均匀地分布于固定长度上, 会产生严重的应力集中现象。由于粘结应力分布的不均匀性, 随着锚杆上荷载的增大, 在荷载传至固定长度最远端之前, 在杆体与灌浆体或灌浆体与地层界面上就会发生粘结效应逐步弱化或脱开的现象 (图 1-9 (a))。

为了从根本上改变集中拉力型锚固方法的弊端, 英国、日本、中国等国家已先后研究

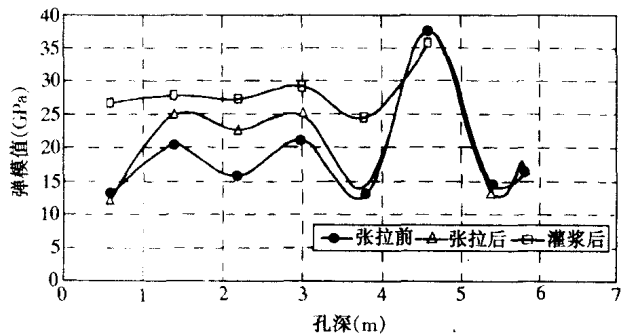


图 1-8 预应力锚固前后岩体弹模测试曲线

应用了单孔复合锚固 (SBMA) 方法。该方法是在同一个钻孔中安装几个单元锚杆, 而每个单元锚杆有自己的杆体、自由长度和固定长度, 而且承受的荷载也是通过各自的张拉千斤顶施加的, 并通过预先的位移补偿张拉 (补偿各单元锚杆在同等荷载作用下因自由段长度不等而引起的位移差), 而使所有单元锚杆始终承受相同的荷载。

这种新型锚固体系, 可将集中荷载分散为几个较小的荷载作用于固定段的不同部位, 使粘结应力峰值大大降低, 因单元锚杆的固定长度很小, 不会发生粘结效应逐步弱化, 能使粘结应力均匀地分布于整个固定长度上 (图 1-9 (b)), 最大限度地调整个锚杆固定长度范围内的地层强度, 锚杆长度可随固定长度的增长而成比例地提高。

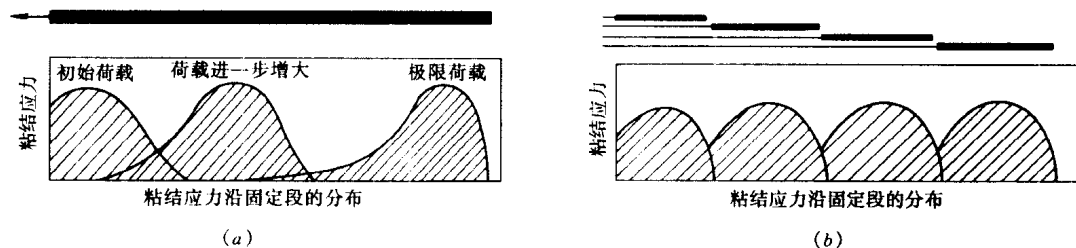


图 1-9 单孔复合锚固型锚杆与集中拉力型锚杆的比较

(a) 集中拉力型锚杆; (b) 单孔复合锚固型锚杆

英国 A. D. Barley 通过对硬粘土中 61 个单元锚杆的试验, 综合考虑了粘结系数以及有效固定长度随固定长度增加而降低的影响, 得出了伦敦坚硬粘土中锚杆固定长度与综合有效因子 (f_c) 的关系曲线, 该曲线表明, 当使用短的 (2.5~3.5m) 固定长度时, 综合有效因子为 0.95~1.0, 几乎能完全调用粘土的抗剪强度。以后, 随着固定长度的增加, 综合有效因子 f_c 急剧下降。当使用很长的 (25m) 的固定长度时, 锚杆的综合有效因子 f_c 可降低到 0.25。英国某粘土工程中, 采用 4 个单元锚杆, 其固定段长分别为 7.4m、5.2m、4.6m 和 3.6m, 锚杆承载力超过 2032kN, 还没有破坏迹象。在香港新机场建设中, 采用单孔复合锚固 (SBMA) 体系, 创造了土锚承载力的新记录, 位于砂和完全崩解的花岗岩地层中, 锚杆钻孔内设置 7 个单元锚杆, 单元锚杆的固定长度分别为 3m 和 5m, 总固定长度长 30m, 在 3000kN 荷载作用下, 未见异常变化。日本称之为 KTB 工法的压力分散型锚杆是典型的单孔复合锚固体系, 已在日本的边坡工程中得到广泛应用, 其单根锚杆的设计承载力常为 600~900kN。

我国冶金部建筑研究总院程良奎、范景伦等人于 1997 年研究开发的单孔复合锚固体系是一种压力分散型锚杆。它是将无粘结钢绞线绕承载体弯曲成 “U” 型构成单元锚杆。这种锚杆用于永久工程, 由于预应力筋 (钢绞线) 有油脂、聚乙烯及灌浆体包围, 形成多层防腐, 且灌浆体受压, 不易开裂大大提高了锚杆的耐久性。它用于临时工程, 使用功能完成后, 可方便地拆除芯体, 不构成对周边地层开发的障碍。至今, 这种新型锚杆已在北京、广州、深圳、大连、浙江、福建等地的岩土边坡、建筑基坑和地下室抗浮等各类工程中获得日益广泛的应用。

五、高承载力锚杆的应用稳步增长

加固和加高混凝土重力坝最适用和最经济的方法是采用后张的岩石锚杆。这种锚杆是永久性的、可监测的和重复加力的。近十年来, 用于加固重力坝的锚杆的极限承载力、长

度和锚固力的集中度均有稳步、增长的趋势。

国内丰满、漫湾、石泉、李家峡等电站的混凝土重力坝相继采用承载力设计值为 6000~10000kN 的预应力锚杆加固。石泉水电站混凝土坝高 65m, 全长 353m, 建于 1973 年, 为提高坝体的安全度于 1989 年采用 29 根 6MN 和 1 根 8.0MN 的预应力锚杆。其中设计承载力为 8MN 的预应力锚杆长 68.5m, 预应力筋由 43 根直径 15.24mm 的钢绞线组成, 钻孔直径 300mm。一年后测得的锚杆预应力值损失小于 1%。李家峡电站在大坝加固中应用了承载力设计值为 10000kN 的预应力锚杆。我国高承载力锚固体系的设计和施工开始进入世界先进行列。

近十多年来国外混凝土重力坝采用高承载力预应力锚杆加固技术发展最快的国家是澳大利亚。在澳大利亚, 自 1980 年以来至少有 15 座坝采用预应力锚杆加固与加高, 其中采用极限承载力超过 9000kN 的锚杆加固、加高的大坝就有 8 座 (表 1-4)。有史以来最长、锚固力最集中的锚杆是澳大利亚堪培拉附近的巴林贾克坝安装的锚杆。巴林贾克坝坝高 75m, 在 1991~1994 年间共安装了 209 根。大坝主墙加高了 13m, 采用 161 根锚杆加固, 所有锚杆的极限承载力均为 16250kN, 最大长度 130m。锚杆分 2 排, 沿坝顶按 1.5m 中心距布置。

澳大利亚采用高承载力锚杆加固与加高的重力坝

表 1-4

大坝名称	加 载 年 份	坝高 (m)	预应力钢绞线 根/直径	单根锚杆极限承载力 (kN)	最大钻孔直径 (mm)
休姆 (2 期)	1987	51	55/15.2mm	13750	312
卡塔拉克特	1988	54	56/15.2mm	13750	310
沃勒甘巴	1989	142	63/15.2mm	16500	310
格伦	1989	37	52/15.2mm	13670	300
马鲁纳	1990	47	52/15.2mm	13670	305
古公	1991	35	36/15.2mm	9400	254
尼平	1992	75	63/15.2mm	16500	314
巴林贾克	1994	79	65/15.2mm	16250	315

六、各具特色的新型锚杆竞相争妍、大大提高了岩土锚固技术的适应性

为了改善锚杆在软弱的塑性变形明显的岩体中的适应性, 包括我国在内的许多国家都先后开发了能全长摩擦锚固的钢管锚杆, 即缝管锚杆 (Split set) 和水胀式锚杆 (Swellex bolts)。这类锚杆安装迅速, 能及时向围岩作用三向支护抗力, 当围岩产生剪切位移, 承受爆破冲击作用时, 锚杆将折曲, 从而能进一步锚固岩层, 因而特别适用于矿山软岩工程。目前在我国的煤矿和金属矿巷道支护中得到了广泛应用, 尤其在美国的金属采矿业中更是广泛使用, 大约有 50% 的巷道和采场顶板支护采用缝管锚杆。

为了解决在松软破碎地层中成孔困难、钻杆拔出随即塌孔、无法安装锚杆的难题, 近年来, 自钻式锚杆在我国有很大发展。这种锚杆是由中空的钢质管材构成杆体, 杆体全长为国际标准波形螺纹, 借助连接器可将锚杆加长到设计长度。这种锚杆的最大特点是锚杆杆体与钻进的钻杆及注浆时的注浆管合为一体, 能有效地保证质量。这种锚杆的标准长度有 2.0m、3.0m、4.0m 和 6.0m 四种。视杆体截面不同, 自钻式锚杆的极限抗拔力分别为