



岩土锚固技术与工程应用

苏自约 闫莫明 徐祯祥 主编



人民交通出版社

China Communications Press

Yantu Maogu Jishu Yu Gongcheng Yingyong

岩土锚固技术与工程应用

——中国岩土锚固工程协会

第十三次全国岩土锚固学术研讨会论文集

苏自约 闫莫明 徐祯祥 主编



人民交通出版社

北京·2004

内 容 提 要

本书系中国岩土锚固工程协会第十三次全国岩土锚固学术研讨会论文集,共编录论文 80 篇。内容包括:专题综述、理论与研究与工程测试、工程设计与施工技术、边坡加固与滑坡处理、基坑支护与基础工程、隧道与地下工程、施工机具与工程材料等。本书既反映了我国近年来,针对岩土锚固技术在工程应用中存在的问题,开展科学试验研究取得的新成果,又吸纳了一批地质条件较为复杂的大型岩土锚固工程实例,内容丰富,涵盖面广,实用性强。本书可供水利、水电、公路、铁路、市政、建筑、冶金、煤炭、地矿、军工等部门从事岩土锚固工程设计与施工的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土锚固技术与工程应用/苏自约,闫莫明,徐祯祥
主编. —北京:人民交通出版社,2004.9
ISBN 7-114-05253-7

I.岩... II.①苏...②闫...③徐... III.岩土工程-锚固 IV.TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 091316 号

书 名:岩土锚固技术与工程应用

著 者:苏自约 闫莫明 徐祯祥

责任编辑:吴有铭

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:31.25

字 数:782 千

版 次:2004 年 9 月第 1 版

印 次:2004 年 9 月第 1 版 第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-114-05253-7

定 价:60.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《岩土锚固技术与工程应用》
编 审 委 员 会

主任委员:徐祯祥

委 员:(按姓氏笔画排列)

丁永贵 王建宇 田裕甲 刘玉堂

朱本珍 何 伟 陈 谦 李成江

李志谦 何益寿 张 雁 杨林德

贺长俊 陶 义 韩学广 廖小平

主 编:苏自约 闫莫明 徐祯祥

序 言

武夷山脉,横亘千里,宛如一条绿色的长龙蜿蜒透迤在闽、浙、赣、粤四省之间。山脉的核心——武夷山,自古以来就以其“奇秀甲东南”的绮丽风光和丰厚底蕴令古今中外的文人、学者和游客赞叹与陶醉。今天,中国岩土锚固工程协会第十三次全国岩土锚固学术研讨会得以在此召开,我们希望和憧憬,本次研讨会的内涵会像一杯清香甘醇的武夷山茗茶令大家向往和回味。

以“岩土锚固技术与西部开发”为主题的 2002 年昆明年会以来,人们高兴地看到:在云南、广西、贵州和其他西部地区的大型水电站工程、高速公路高边坡工程以及城市深基坑工程中,锚固技术得到了更加广泛的应用和发展;该项技术在各类工程的应用水平上也正在不断提高,例如在对付高达数百米的高边坡堆积体滑坡方面,已经和正在开发若干新的锚固技术方法,并已初获成功;除此之外,在锚固工程设计方法、新型锚固机具研制以及锚索和岩体现场测试技术等方面也有了长足的进步。

本次学术研讨会共收到 90 余篇应征论文,经编审委员会组织专家评审,共有 80 篇论文被收入本论文集。综观全部入选论文可看出,除了一部分论文对岩土工程的锚固理论和设计计算方法作了较深入的探讨外,大部分论文叙述了岩土锚固技术在各种不同工程中的实际应用成果。其中不少论文对高边坡工程的滑坡和大变形治理方法作了研究,并讨论了难度很大的堆积体中成孔技术问题,提出了一些行之有效的处理方案;一部分论文在以往成果的基础上对处于软弱土层和淤泥中的深基坑采用复合式土钉墙的应用作了探索,并就其设计和试验提出了一些新见解;另外,值得注意的是,有的论文作者用较多精力进行了锚杆锚索防腐长期使用效果的研究,应该说,对锚杆和锚固工程的整体耐久性的高度重视说明了锚固技术已登上了一个较高的台阶;此外,有的论文对锚固工程中的信息化技术以及监测技术中的自动化、数字化、网络化和集成化作了详细论述,提出了发展的方向;本论文集还选入了关于隧道、地下工程以及施工机具和新材料方面的好文章。以上论文反映出来的内容均是近年来岩土锚固科技工作者所获得的令人欣喜的成果。诚然,我们还必须看到,摆在岩土工程师面前的困难和问题还很多,例如:高陡边坡锚固施工及实用机具问题、滑坡整治后长期稳定及监控问题、锚固系统的耐久性及其预测问题、深厚岩土堆积体的钻孔及锚固问题,等等。这些问题有待于广大科技工作者的共同探索和研究,通过坚持不懈的努力逐步得到解决,使我国岩土锚固技术达到更高的水平。

本次研讨会的主题定位在“岩土锚固技术与工程应用”。因此,希望通过会议的学术交流,能将一些先进的和实用的岩土锚固技术和工程理念更快地在已经实施或正在计划的工程中得以推广应用。最后,衷心祝愿第十三次全国岩土锚固学术研讨会圆满成功!

中国岩土锚固工程协会 理事长
徐祯祥
2004 年 10 月

目 录

1 专题综述

岩土工程锚固理论与计算技术的发展与展望	徐祯祥等 (3)
岩土工程监测技术与动态设计方法的新进展	梅志荣等 (11)
锚索的锈蚀、防护及永久锚索的合理结构	刘玉堂等 (20)
锚固工程技术在福建省高速公路高边坡治理中的应用	卢才金 (32)
基坑工程中复合土钉支护(墙)受力机理及发展	李象范等 (39)
全长粘结型预应力锚杆(索)的理论分析和试验研究	廖小平等 (46)
桩锚支护技术在深圳地区的应用现状及分析	王贤能等 (52)
预应力锚索结构受力分析及防腐保护	陈文杰等 (58)

2 理论与研究与工程测试

锚索抗滑桩的受力特点及锚索与桩受力协调问题	王 楨 (67)
预应力锚索结构分析及受力思考	孙学毅等 (72)
屈原污水处理厂岩土边坡锚固设计研究	何本贵等 (80)
庆阳北石窟斜坡岩体病害分析及治理工程设计	王逢睿等 (89)
试论岩土锚固工程的失效因子	黄晓华等 (94)
压力型锚索受力分析	孙 波 (100)
预应力锚杆柔性支护法的数值模拟分析	贾金青等 (105)
平庄西露天矿非工作帮边坡锚索加固分析与稳定性评价	李立等 (110)
复合土钉支护中杂填土厚度对边坡变形的影响	郑志辉 (117)
岩土锚固工程设计与分析的计算机软件综述	高谦等 (122)
填土边壁(坡)雨致滑塌破坏模式研究	曾宪明等 (132)
关于锚索预应力损失及其测试方法的探讨	杨存进 (144)
瀑布沟水电站预应力锚索试验	崔金海 (149)
反射波法在锚索长度检测中的应用	宋海量等 (156)
川藏公路龙胆溪滑坡群治理工程锚索预应力测试情况分析	王 楨 (161)

3 工程设计与施工技术

边坡加固设计的几个问题	刘成洲等 (171)
百色水利枢纽消力池锚固设计	蒙承刚等 (175)
路堑高边坡防护加固工程数值仿真设计技术的探讨	王 浩等 (180)
土钉与注浆钢管单支点排桩联合支护设计	公宝兴等 (188)
预应力锚索抗滑桩板墙的设计	黄晓华等 (193)
膨胀性岩土边坡稳定性分析及加固方案设计	杨文礼 (200)

锚式桩间挡土板构建初探	徐国民等 (205)
土钉动载设计及边坡抢险技术在某工程中的应用	左魁等 (210)
小湾电站饮水沟堆积体边坡锚索钻孔技术探讨	佟强 (217)
某回填土深基坑支护设计和施工技术	程学军等 (221)
三峡船闸锚固工程防护技术	陈孝英 (225)
岩溶路基注浆加固施工技术	田宇 (231)

4 边坡加固与滑坡治理

压力分散型预应力锚索在百色水利枢纽边坡加固中的应用	钟瑞辉等 (239)
抱龙峪试验区高边坡病害成因分析	刘立志 (248)
预应力锚索在高速公路填方路基病害处理工程中的应用	蔡立 (253)
柳南高速公路 K727 + 900 上行线路基边坡加固处理	韦勇生等 (258)
压力分散型锚索在开阳高速公路边坡工程中的试验研究	王建松等 (263)
预应力锚索在抱龙峪高边坡加固工程中的施工技术	赵成江 (268)
几种锚固工程抑制结构在福建高速公路的应用	林石泉等 (272)
青海平太公路何群峡段危岩整治工程锚孔施工工艺	龚友兵 (277)
无动力仰斜排水孔在铜黄公路边坡治理中的应用	吴璋等 (281)
锚索在平庄西露天煤矿边坡加固中的应用	吴学民 (284)
草田山滑坡治理工程分析	汪江波等 (289)
高速公路平苍段十标地质灾害的防治	刘刚等 (295)
客土吹附技术在公路边坡生物防护中的应用研究	田青怀等 (301)
坡面人工生态恢复与植物选择	陈琳 (304)
植物在护坡工程中的应用	辜再元 (308)
十字型叠合承压板在锚固工程中的应用	冷景岩等 (313)
预应力锚索在高边坡病害治理中的应用	郑翔 (319)
预应力锚索框架在高边坡加固中的应用	马华等 (324)

5 基坑支护与基础工程

西铁科技大厦基坑边坡喷锚支护的设计与施工	丁世敬等 (335)
杭州运河广场深基坑围护与监测实录	徐友法等 (339)
复合土钉墙与支撑体系在深基坑工程中的应用	许峻峰等 (344)
土钉支护整体稳定性计算中关于土钉受力的探讨	尹骥等 (350)
淤泥质土条件下复合土钉支护的研究与应用	尹骥等 (354)
深埋桩多解设计在基坑支护改造工程中的应用	许建平等 (358)
某机场锚索高挡墙设计简介	朱冀军等 (362)
钻孔压浆桩在 KM6 工程的应用	陶义 (367)
锚杆技术在北京水泥厂 3 号磨机基础加固中的应用	游启枝 (370)
深搅桩止水帷幕和土钉墙在基坑支护中的应用	和曙泉等 (373)
岩土锚固技术在软弱土层深基坑工程中的应用	邢厚俊等 (379)
深圳新世界中心大厦深基坑支护的设计与监测	林明博等 (385)

岩石抗浮锚杆的现场试验及分析	钱春宇等 (390)
两级基坑土钉墙综合测试分析	范景伦等 (396)

6 隧道与地下工程

隧道工程中的钢纤维喷射混凝土	王建宇 (413)
软弱岩体中椭圆形巷道喷射纤维混凝土支护机理探讨	孙学毅 (422)
矿用锚索参数设计与施工	闫莫明 (428)
阳泉矿区一次动压巷道锚索支护参数优化决策	高谦等 (434)
锚索支护技术在阳泉矿区的应用	刘福军 (442)
北京市中轴路地下通道综合施工技术的应用	李琳 (449)

7 施工机具与工程材料

偏心跟管钻具的配套及其在使用中的改进	高申友等 (457)
高陡坡新型锚固施工方法及设备	石午江 (460)
树脂锚固剂在水电站洞室预应力锚杆工程中的应用	耿会英等 (464)
XMP 外加剂在东曲矿西大巷延伸工程中的应用	张建康等 (469)
新型预应力岩土成品锚索的研制	杨雄文等 (473)
纤维增强塑料锚杆发展综述	谷传耀 (478)
EX 型涨壳式中空(预应力)注浆锚杆的开发与应用	吴德兴等 (484)

1 专题综述

岩土工程锚固理论与计算技术的发展与展望

徐禛祥¹ 高 谦² 明世祥²

(1.铁道科学研究院铁建所 2.北京科技大学土木工程学院)

摘 要 本文简要地介绍岩土工程技术在工程中的应用与发展趋势,并论述了锚固设计理论、计算技术与施工工艺的研究与发展,并展望了岩土锚固理论的研究和发展方向。强调岩土锚固理论与分析方法的正确应用,关键在于正确的工程概念与指导思想。

关键词 岩土锚固技术 计算技术 发展与展望

1 引言

岩土工程源远流长,穴居便是人类最早的岩土工程。岩土工程如水库高坝、高层建筑、道路桥梁、港口码头、地铁隧道等与能源、交通、生产及生活密切相关。岩土工程的开发水平与建设速度,标志着一个国家的现代化发展水平。岩土锚固技术是近代岩土工程领域中的一个重要分支,由于它的安全、经济和有效,越来越广泛地应用于各个工程领域;同时,岩土锚固设计理论与计算技术、锚固材料、结构形式、施工工艺、现场测试等方面均已取得了长足的进展。

为满足日益复杂、高效的现代化生产和生活的需要,岩土锚固技术在我国岩土工程建设中将发挥更大的作用,必将迎来更快的发展机遇和更广阔的应用前景。

1.1 西部大开发将加快交通基础设施建设,从而将修建大量铁路、公路隧道

我国西部地区由于自然条件比较差,经济落后,加上基础薄弱和起步比较晚等原因,交通基础设施落后的状况十分突出:一是路网密度低,公路路网密度仅为 $7.8\text{km}/100\text{km}^2$,只是全国的一半;二是公路等级低,二级以上公路比重仅占 6.9% ;三是公路通达深度低。铁路网也较东部地区有较大差距。根据中央开发西部的战略部署,要求用30年左右时间,在西部地区建成现代化公路网络,特别是在5~10年内完成连接西部地区的拉萨到丹东、银川到青岛等8条国道主干线的建设,打通滇藏、川藏成都到樟木等8条省际间主要公路通道。众所周知,西部地区多为山地,高等级公路必将会出现一些长隧道和隧道群,因此,这将为锚固技术在复杂地质条件中的应用提供更多、更良好的机遇和表演舞台。

1.2 我国城市人口激增,城市地域扩大,开发利用城市地下空间势在必行

随着我国经济的高速发展,我国城市化水平正在快速提高。据预测,到2010年,我国城市总数将由1996年的640个增加到1000个,其结果将占用大量的耕地。耕地的减少,会带来严重的后果。土地是不可再生的资源,是我国持续发展和赖以生存的基础,为了提高城市土地的使用率,向地下要生存空间将成为21世纪发展的趋势。

1.3 长、大海底隧道可望兴建

在20世纪末,许多学者提出修建横穿台湾海峡连接大陆与台湾的海底隧道和横穿琼州海峡连接大陆与海南的海底隧道,并于1998年在厦门召开了“台湾海峡隧道学术论证研讨会”。

此外,国内有关单位组织研究横穿渤海海峡连接辽东半岛与山东半岛的海峡通道(南桥北隧)和连接上海、崇明岛、南通的长江越江通道以及横跨胶州湾连接青岛和黄岛的青黄通道工程等。

1.4 南水北调工程上马,将会出现很多输水隧道

调水工程在中国已有若干工程实例,如引滦入津、引大入秦、引黄入晋等工程。调水工程翻山越岭,必须修建隧道,如引滦入津工程修建若干座穿山输水隧道,引大入秦修建的盘道岭隧道长 15.8km,引黄入晋工程也修建了 21km 的隧道。由于我国北方地区连续多年干旱少雨,北方所有城市缺水严重,将影响人们生活和制约着经济的发展。已经上马的南水北调东中线工程,尤其即将上马的西线方案,必将面临复杂地质条件的桥隧工程、过江隧道,这必将涉及岩土锚固技术的应用。

1.5 深部高应力环境下资源的开采必将面临巷道支护和稳定性控制问题

我国已探明的煤炭资源量占世界总量的 11.1%,在今后相当长的历史时期内,仍需保证煤炭的高产稳产。我国煤炭资源埋深在 1000m 以下的为 2.95 万亿 t,占煤炭资源总量的 53%。目前,煤矿开采深度以每年 8~12m 的速度增加,东部矿井正以每年 10~25m 的速度发展,预计在未来的 20 年,很多煤矿将进入到 1000~1500m 的开采深度。此外,目前,我国有一批有色金属矿山也已进入采深超过 1000m 的深部开采阶段。

深部矿床资源的开采,必然给地下工程的建设带来一系列问题,如地下工程的稳定性、冲击地压、岩爆以及高温、高压和高孔隙压力所带来的一系列问题,因此,岩土锚固技术也必有用武之地。

2 岩土锚固理论、技术与应用现状及发展

2.1 岩土锚固技术的应用现状与发展

(1) 岩土锚固技术的应用现状综述

自从 1911 年美国首先将锚杆应用于矿山巷道支护以来,锚固技术已经经历了近一个世纪的发展。从最初人们的怀疑、疑虑,发展到今天,锚固技术已经几乎不受限制地广泛应用于岩土工程的各个领域。由于锚杆支护显著的技术经济优越性,现已发展成为世界各国矿井巷道以及其他地下工程支护的一种主要形式。早在 20 世纪的 40 年代,美国和前苏联就已在井下巷道使用了锚杆支护,以后在煤矿、金属矿山、水利隧道以及其他地下工程中也迅速得到了发展。几十年来,世界锚杆支护经历了如下发展历程:1945~1950 年,机械锚杆研究与应用;1950~1960 年,采矿业广泛采用机械式锚杆,并开始对锚杆支护系统进行研究;1960~1970 年,树脂锚杆推出并在矿山得到应用;1970~1980 年,发明了管缝式锚杆、胀管式锚杆并应用,长锚索产生;1980~1990 年,混合锚头锚杆、组合锚杆、桁架锚杆、特种锚杆等得到应用,树脂锚固材料得到改进。

美国、澳大利亚等国由于煤层埋藏条件好,加之锚杆支护技术不断发展和日益成熟,因而锚杆支护使用很普遍,在煤矿巷道的支护比例几乎达到了 100%。西欧、中欧一些主要产煤国家,过去巷道中主要采用金属支架支护,随着巷道维护日益困难和支护成本的增加,各国均在积极发展锚杆支护。锚杆支护发展最快的是英国。在 1987 年以前,英国煤矿巷道支护 90% 以上采用金属支架,1987 年英国从澳大利亚引进了成套的锚杆支护技术,从而扭转了过去的被动局面,煤巷锚杆支护得到迅猛发展,1994 年在巷道支护中所占比例已达到 80% 以上。

我国矿山巷道的锚杆支护的发展也比较迅速。据煤矿和金属矿山巷道中采用锚杆支护或

锚杆与喷射混凝土支护的初步统计,从 1960 ~ 1995 年末的 35 年间,累计使用量已超过 35000km,年使用量已超过 1600km。工程实践表明,采用锚杆与喷射混凝土支护取代传统的混凝土支护,可以加快施工速度 2 ~ 4 倍,节省劳动力 50% 以上,节约全部木材和 40% 以上的混凝土,降低支护成本 35% ~ 45%。特别是进入 20 世纪 80 年代,把锚杆、喷射混凝土支护与现场监控量测、信息反馈技术巧妙地结合,采用及时支护、分期施工、刚柔适度、全环封闭等一整套充分发挥围岩自承能力的设计原则,已成功应用于一批复杂地质条件的隧洞工程,如高地应力(水平应力达到 30MPa)、软岩大变形巷道(水平收敛量达 25 ~ 30cm)地层控制(如金川镍矿)、开拓于半胶结的泥页岩中并受采动压力影响的煤矿巷道工程、覆岩层厚度仅 10 余米的 Q3 黄土质泥土的隧洞工程(如军都山隧洞)。这些有代表性的地下锚固工程的建成,标志着我国软弱地层中的地下工程的锚固技术的应用已经有了突破性进展。

(2) 预应力锚索在水电大坝边坡和坝基工程中的应用

云南漫湾电站于 1989 年 1 月在坝、厂范围的左岸边坡产生约 10.6 万 m^3 的塌滑体,采用 2200 根 1000 ~ 3000kN 级预应力锚索与锚固洞、坑滑桩相结合的综合治理措施,成功地控制了左岸边坡潜在的滑移和破坏。长江三峡链子崖危岩体在地震、暴雨、久雨等因素综合作用下,潜在崩塌将造成碍航,甚至堵江的严重隐患,其中“五万方”危岩体潜在的变形破坏最为明显。对此,在不同部位分别采用了 3000kN、2000kN 和 1000kN 的预应力锚索 185 根,总锚固力达到 311000kN。

长江三峡水利枢纽工程高 170m 的船闸边坡,其中 67m 高垂直边坡,共采用 3000kN 及 1000kN 级的预应力 2000 余根,以保持边坡的稳定,并控制了边坡的变形。

在坝基工程中,无论是新坝建造还是旧坝加固,预应力锚固技术已经成为经济有效的处理方法。早在 1964 年就曾用长 30 ~ 47m 的预应力锚索加固在使用中出现偏斜和裂缝的安徽梅山水库右岸坝基,单根预应力锚索的最大张拉荷载达 3240kN。近年来,在漫湾、双牌、洪山水利枢纽工程中,均成功地采用预应力锚索加固技术,单根锚索的最大承载力达 3200kN。天生桥水电站在下山包滑坡整治中也采用了和预应力锚索加固技术,共施工了长锚索 246 根,深度 22 ~ 32m,锚索累计长度达 7041m,锚索的设计锚固力为 1200kN。长江三峡链子崖危岩体,即“五万方”采用 1000kN、2000kN 和 3000kN 三种预应力锚索,钻孔平均深度为 35m,最大深度为 51m,均通过 T11 裂缝或下部 R203 软弱层而进入稳定基岩层一定深度。锚索共用 175 根,总锚固力达 321000kN。其上部即所谓“七千方”危岩体,采用 1000kN 锚索 35 根,平均钻孔深 16.5m,总锚固力达 35000kN。

(3) 岩土锚固技术在深基坑支护中的应用

近十几年来,在深基坑支挡工程中,土层锚固技术占有重要地位。采用预应力锚杆背拉各种类型的护壁桩与地下连续墙作基坑支护,不仅有利于减小侧向位移,也可以显著地降低桩的弯曲应力和减小桩的截面面积和长度。因此,深基坑锚固技术的应用与传统的桩、板、墙、管、撑和改良的桩锚、板锚、墙锚、撑锚支挡方法相比,具有造价低、节省工期、占地空间少、支护及时快速和安全稳定性好等优点,其综合经济技术效益显著。预应力锚杆(索)已在北京、上海、广州、武汉、深圳、厦门、沈阳等全国各地的基坑支护中得到了广泛的应用,工程实例不计其数,并取得了良好的技术经济效果。

北京京城大厦是中国较深的基坑支护工程,地面以下 23.5m,采用 488mm × 300mm 的 H 型钢桩和 3 排预应力锚索作为支挡结构,有效地维护了基坑的稳定。北京中国工商银行营业办公楼基坑深 15.5m,采用一排预应力锚杆(单根锚杆承载力为 600kN)背拉钢筋混凝土护壁桩,

桩深入坑底 3.5m, 基坑最大水平位移仅 7mm。高度为 110.5m 的上海太平洋饭店基坑深 11.65m, 所处地层为饱和淤泥质粘土, 采用厚 40cm 钢筋混凝土板桩与 4 排预应力锚索作支挡结构, 预应力锚索长 30~35m, 采用二次高压灌浆工艺, 锚索预应力达 500~600kN, 在使用后保持基坑的稳定。天津百货大楼基坑深 13.5m, 处于软弱粉质泥土地层中, 地下水埋深 1.0~1.5m, 采用四排预应力锚杆背拉 70cm 厚地下连续墙。

锚固技术在北京东方广场深基坑工程中的应用是一典型的实例。该工程为一个大型深基坑工程, 工程量大, 地质条件复杂, 需要拆除的地下建筑物、障碍物和地面建筑物多, 因此施工难度很大。基坑采用桩锚支护系统, 围护结构采用 $\phi 800\text{mm}$ 和 $\phi 1000\text{mm}$ 、间距 1.5m 的钻孔灌注桩, 局部采用 H 形钢桩; 锚杆支护采用 1~3 道预应力锚索, 并加土钉支护形成复合支撑; 在地面下 1.5~2.5m 处 1 砌筑挡土墙, 墙和桩顶设帽梁。经过一年对基坑施工过程的现场监测表明, 尽管预应力锚索的锁定瞬间应力损失平均达到 18.8%, 但是支护体系总体稳定性较好, 基坑顶最大水平位移值为 40mm, 一般为 10~30mm, 地面沉降仅为 3~5mm, 达到了设计要求。

(4) 岩土锚固技术在其他工程中的应用

随着锚固技术的发展以及在岩土工程中的成功应用, 它不仅应用于风化软弱岩层, 而且已经扩展到土体工程的加固。如防止高塔倾倒、高架桥倾倒以及挡土墙倾覆的加固; 防止桥墩滑动、悬索桥锚固、吊桥桥墩锚固以及大跨度拱形结构物的稳固。

2.2 岩土锚固工程技术的研究与发展

锚固技术在岩土工程中的广泛应用, 大大地促进了岩土锚固技术的研究与发展。总结各国锚固工程的生产实践经验, 主要有以下几个特点:

(1) 结合本国岩土工程的地质及生产条件, 发展适宜的锚杆类型

美国使用了树脂锚固钢筋锚杆、机械式锚杆、摩擦式锚杆(管缝式、水力膨胀管式)、混合式锚杆等; 此外, 桁架锚杆在煤矿中也有较大发展。澳大利亚、英国等则以全长树脂锚固金属锚杆为主要发展方向, 也使用一些缝管锚杆、树脂可切割锚杆。德国除了发展树脂锚固金属锚杆外, 还大力发展可伸长锚杆。他们认为, 安装锚杆的目的是为了控制围岩的变形, 但在围岩剧烈变形的条件下, 又要能适应围岩变形, 使锚杆本身不受到损坏, 因此, 发展既有足够的支护阻力, 又有一定延伸性的可伸长锚杆是必要的, 现已研制出了若干种类型, 延伸率最大可达 50% 的锚杆。俄罗斯煤巷锚杆支护也是多种类型同时使用。

(2) 国外锚杆日益向高强度、超高强度发展, 其技术途径主要有二: 一是研制强度高和具有较好延伸率的材料; 二是加大锚杆直径。关于锚杆材质, 大致可以分为三类: 一类是普通锚杆, 材料的屈服强度 $\sigma_s < 340\text{MPa}$; 二是高强度锚杆, 材料的屈服强度 $340\text{MPa} < \sigma_s < 600\text{MPa}$; 三是超高强度锚杆, 材料的屈服强度 $\sigma_s > 600\text{MPa}$ 。不论哪种材料, 其延伸率均应大于 15%~17%。国外三种类型的锚杆材质均在使用, 而以高强、超超强的居多。例如, 澳大利亚锚杆材料的 σ_s 一般均在 400~600MPa 之间, 有的甚至大于 600MPa, 近年又在研制 σ_s 达 800MPa 的更高强度钢材; 英国使用的锚杆钢材的 σ_s 达 610MPa; 美国的达 520MPa。关于锚杆直径, 多数采用 $\phi 20$ ~ $\phi 22\text{mm}$, 也有使用 $\phi 24\text{mm}$ 的。由于钻孔直径一般均为 $\phi 28\text{mm}$, 因而锚杆直径的提高受到一定的限制。从锚杆直径和材质综合考虑, 锚杆破断荷载一般均在 200kN 以上, 后来又发展到 300kN 以上。近年来, 英、澳均在研究 400kN 以上的大锚杆。

(3) 完善锚杆施工配套机具也有各国促进锚固技术发展的重要原因。掘锚联合机组的发展, 为矿山巷道掘进和锚杆施工创造了极为有利的条件, 奥钢联和乔伊公司的掘锚联合机组应用较多。单体锚杆钻机也有很大发展, 主要是风动锚杆钻机, 并配有使用方便、耐磨性好的钻

杆和钻头,以及快速安装系统等。

2.3 岩土锚固理论与设计方法的研究与发展

岩土锚固技术在工程中已经得到广泛的应用,尽管人们一直在不断的探索和研究,然而,由于岩土锚固工程的复杂性,使得锚固机理的研究和设计理论远远落后于工程实践。因此,工程经验和现场监测在锚固设计以及稳定性评价中仍占有重要地位。

正确地设计和应用锚固技术,必须对锚杆的加固作用机理有正确的认识,并以此研究锚固工程结构的破坏模式,在此基础上进行稳定性分析和支护参数设计和优化。

随着科学技术的发展,人们不仅限于对锚固工程的实践总结,而且还可以借助于计算机进行锚固作用机理的研究,由此能够深入探究锚杆与围岩的相互作用机理、影响因素以及可能发生的失稳模式。总结岩土锚固理论的研究与发展,大致归结为以下几种观点:

(1)已经得到普遍接受的锚固支理论

在锚固技术的长期应用中,人们根据现场失败的教训和成功的经验,并结合室内的模型试验研究,先后提出了目前已经普遍接受的几种理论:悬吊理论、组合梁理论和组合拱(压缩拱)理论。

(2)目前正在研究发展的锚固支护作用理论

随着锚固技术的应用与发展,人们已经意识到现有的锚杆支理论和作用原理还不能对锚固作用机理给予合理的解释和定量评价,在前人研究的基础上,目前又提出了几种新的理论,较有代表性的有以下几个:

①最大水平应力理论。最大水平应力理论由澳大利亚学者盖尔(W.J. Gale)提出。该理论认为,矿井岩层的水平应力通常大于垂直压力,水平应力具有明显的方向性,最大水平应力一般为最小水平应力的1.5~2.5倍。巷道顶底板的稳定性主要受水平应力的影响,且有三个特点:其一是与最大水平应力平行的巷道受水平应力影响最小,顶底板稳定性最好;其二是与最大水平应力呈锐角相交的巷道,其顶底板变形破坏偏向巷道的某一侧壁;其三是与最大水平应力垂直的巷道,顶底板稳定性最差。

由于目前的一些锚杆支理论是限于一定的地质条件和工程类型提出的,因此,尽管得到多数工程的认可,但在某些情况下,它仍不能较好解释和揭示实际作用机理。实际上,对于复杂的岩土工程,其锚杆的支护作用机理并非单一的,在很多情况下,是多种作用机理同时存在,只不过是有一种或两种作用机理为主而已。

②锚杆支护围岩强度强化理论。中国矿业大学矿山压力研究所,在分析已有研究成果的基础上,研究并提出了锚杆支护围岩强度强化理论。该理论揭示了锚杆的作用原理和加固围岩的实质,并为合理确定锚杆支护参数提供了理论依据。

该理论所提出的观点实际上在锚固设计和理论分析中均有所意识,但均把此作用作为附带的,是作为参数的储备加以考虑。围岩强度强化理论的提出,首次强调了锚杆的锚固作用在于提高了锚固岩体的强度。但如何定量评价锚杆参数与提高围岩强度的关系有待于进一步研究。

③围岩松动圈理论。围岩松动圈理论是中国矿业大学针对煤矿巷道的锚喷支护首次提出的。该理论认为,由于巷道的掘进,破坏了原岩应力的平衡,改变了原岩应力状态,当围岩应力升高范围的岩体强度低于其应力时,发生屈服破坏。这种破坏将由巷道周边向深部发展,由此在巷道周围形成了不利于围岩稳定的松动岩体(松动圈),因此,松动圈的范围就决定了巷道的稳定性,也是锚杆支护设计的依据。本理论还提出了基于松动圈范围的支护参数。松动圈理

论将围岩内不能自稳的岩体作为支护的对象,并提出可以用声波测试来确定松动圈范围。松动圈理论的重要突破在于:明确巷道支护对象是巷道周围的松散软破岩体,既不是弹塑性支护理论中的塑性区岩体,也不是冒落拱内的岩石重量,并强调松动圈形成的时间性、发展的渐进性以及围岩应力与性质相互作用和动态变化。但该理论仍存在以下两点不足:首先是松动圈理论明确提出的松动圈范围的确定问题。对于软破岩体,节理极为发育,尤其软破岩不同程度地含有粘土质膨胀矿物,很难通过声波测试明确地确定出松动圈范围。实际上,围岩松动圈边界是十分模糊的,并且随着时间和采矿活动影响发生变化。其次是该理论没有体现支护与围岩的相互作用。

(3) 岩土锚固机理与设计理论和方法的研究与发展趋势

由于锚固技术在众多岩体加固和工程治理中的成功应用,因此,锚固机理与设计理论及设计方法已经受到岩土工程界的关注和深入研究。尤其近 10 年来,随着计算机和数值分析方法的研究与发展,借助于数值分析方法,锚固机理和优化设计的应用研究已经取得较大进展。可以说,工程经验、理论与数值分析、现场测试与反馈已经成为锚固设计缺一不可的手段。

现代锚固理论首先要认识到岩土锚固设计所使用的信息的“三性”(信息的不完备性、不确定性和模糊性)和动态特征(设计人员在认识其特性随工程进展而深入和工程特性随变形而变化),因此,在锚固设计中,工程经验、理论计算和现场监测三者可互为参照、对比分析,并且采用信息化施工和动态反馈,使三者的信息逐步趋于一致。这种设计理念与传统设计方法相比,可以说是岩土锚固工程在设计理论上的一大进展,具体表现在以下方面:

① 岩土工程锚固设计概念的突破。不同于其他工程,岩土工程稳定状态与破坏模式,不仅取决于岩土工程特性(工程规模、支护类型与参数及地质条件),而且还依赖于工程施工工艺(施工顺序、爆破方法和施工时间)。因此,岩土工程锚固设计不仅限于锚固参数的设计,而且还必须包含施工方法与工艺参数的确定。所以,现代锚固设计理论已经将传统结构工程设计概念,延伸为包括“锚固参数”和“施工工艺”两个方面设计的广义“设计概念”。

② 所采用的设计理论和方法上的突破。现代设计理论认识到岩土工程所固有的特性(知识的不完备性、模糊性和不确定性),认为依赖于任何一种计算理论或技术都不可能准确地解决复杂的岩土锚固工程问题。但是,各种不同的设计理论、工程经验、监测信息又从不同角度、不同方面,局部地揭示和表征了其工程特性,是锚固工程设计和稳定性评价的重要信息和资料。所以,现代锚固设计理论的指导思想对各种理论与方法采取“取其之长、避其之短,求同、存异的原则,应用于工程设计。

③ 对岩土锚固工程特性认识上的突破。现代锚固设计理论认识到岩土锚固工程具有其他工程所具有的两种动态特性:工程特性本身的动态变化和人们在认识工程特性随工程进展而深入。由于围岩和锚固结构相互作用,因此,工程的稳定状态是随着它们的相互作用的变化而变化;另一方面,岩土工程的开挖、支护不是一次完成的,因此,人们在分阶段(步)开挖和分次支护中,对岩土工程所表现出的工程特性(变形趋势和稳定状态),是逐步深入认识和了解的。正是岩土锚固工程所特有的双重动态特征,现代锚固设计理论所采取的系统、动态、反馈思想和设计理念,以动态地而不是静态地实施锚固工程的设计、施工和优化。

④ 在设计思想上的突破。正是现代锚固设计理论对岩土锚固工程特性认识上的改变,使其在设计思想上采取动态设计而不是静态设计;采用综合信息而不是局部信息。

现代锚固设计理论是随着锚喷支护技术的应用和发展而发展的,尤其是新奥法的成功应用和发展,使人们才深刻地认识到岩土锚固设计的真正含义和作用。实际上,自“新奥法”诞生

之日起,不仅引起隧道与地下工程界的关注,而且也引起整个岩土锚固界的密切注意,从而在岩土锚固设计中都不同程度地体现隧道“新奥法”施工的思想。

目前,随着这种思想逐步被人们所接受,现代岩土锚固设计正在逐渐向程序化和规范化方向发展,成为今后岩土锚固技术应用研究的发展趋势。

3 结束语

岩土锚固工程已经获得较大发展,在快速发展的 21 世纪,它必将获得更大发展。然而,岩土工程所具有的复杂性,使得岩土锚固设计落后于工程实践。但是,随着岩土锚固理论的深入研究和进展,其设计理论和计算方法在锚固设计中必将起到越来越重要的作用。尤其近十几年来,岩土锚固数值方法的理论与程序的发展,为岩土锚固设计提供一个重要的分析手段,为深入了解锚固体的工程特性、作用机理和参数决策提供了一个不可缺少的工具。但岩土锚固工程设计理论目前还不成熟,完全依赖于工程经验类比也不可能解决日趋复杂的工程设计需要,因此,现场监测在设计的反馈和修改设计中起到重要作用。显然,工程经验、现场监测和计算在岩土锚固设计中都将起到重要作用。如何在设计中充分结合和利用,不仅体现了设计者的水平,更重要的是决定了锚固工程的安全、经济和可靠。工程判断在锚固设计中起着决定性作用已无须怀疑。但是正确的工程判断不是天生的、杜撰的,而是对来自于工程经验的积累、资料的总结、信息的使用和知识的外延。它既依赖于设计者的工程设计阅历,也与其理论知识以及使用理论解决问题的能力有关。

理论和数值分析对于工程设计也是需要的,它不仅可以提供设计判断所需的信息,更重要的还是锚固工程优化必不可少的手段。

应该强调的是,无论何种数值方法和计算理论,它仅仅是一种“工具”而已,既然是工具,当然不同水平的使用者对于同一问题可能会获得相差甚远的计算结果。这如同一把小提琴,有人用它发出的是噪音,而小提琴大师却奏出的是令人陶醉的美妙乐曲。这正是对于同一工程问题的数值计算,不同的计算者却给出相差甚远的计算结果的原因所在。但是,这并不能否定它在锚固工程设计中的作用和地位。正如一篇评论性文章所强调的:“设计师的职责并不在于精确计算,而在于正确判断。”而计算、监测和经验正是为设计师提供正确判断的所采用的手段。

随着岩土锚固技术的研究与发展,计算技术、现场监测和工程经验这三种手段的综合集成、动态实施和信息反馈的设计理念 and 方案,不仅为岩土工程界所理解和接受,并且必将逐步向“程序化”和“规范化”方向发展。这也是岩土锚固设计向“科学化”方向发展的必由之路,也是岩土锚固工程优化设计和稳定性评价的关键所在。

参考文献

- 1 闫莫明,徐祯祥,苏自约主编.岩土锚固工程手册.北京:人民交通出版社,2004
- 2 徐祯祥.岩土锚固工程技术发展的回顾.岩土锚固技术与西部开发.北京:人民交通出版社,2002
- 3 钱七虎.地下空间开发利用的第四次浪潮及中国的现状、前景和发展战略.新世纪岩石力学与工程的开拓和发展,北京:中国科学技术出版社,2000
- 4 王梦恕.21世纪是隧道及地下空间大发展的年代.西部探矿工程,2000(1)
- 5 孙钧.隧道力学问题的若干进展.西部探矿工程,1993(4)