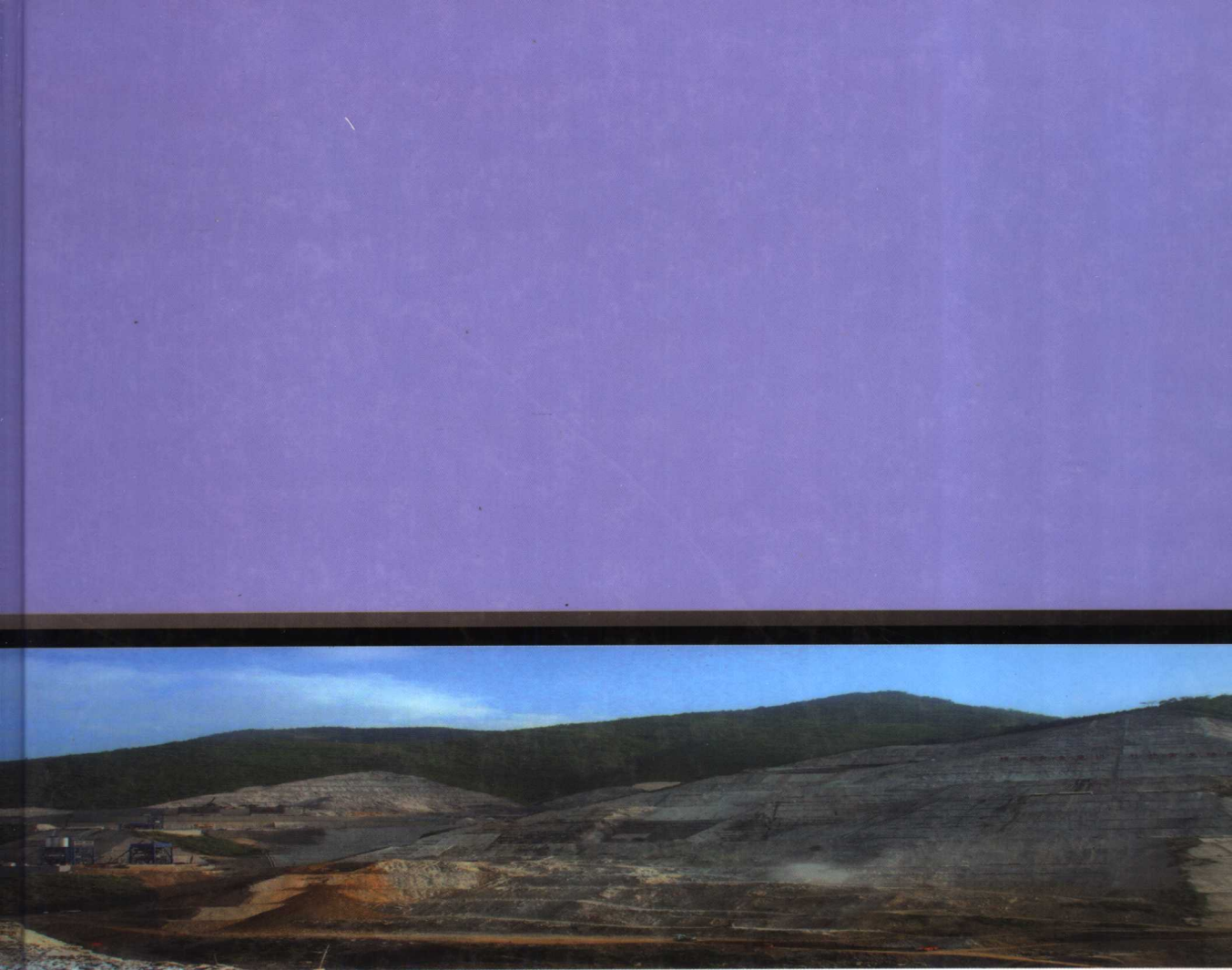




锚固技术在岩土工程中的应用

苏自约 陈 谦 徐祯祥 刘 璇 主编



人民交通出版社

China Communications Press

锚固技术在岩土工程中的应用

——中国岩土锚固工程协会第十五次全国岩土锚固学术研讨会论文集



苏自约 陈 谦 徐祯祥 刘 璇 主编



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书系中国岩土锚固工程协会第十五次全国岩土锚固工程学术研讨会论文集,共编录论文81篇。内容包括:专题综述、理论研究与工程测试、工程设计与施工技术、边坡加固与滑坡治理、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。本书既反映了近年来我国科技人员在岩土锚固技术基本理论、工程设计方法、现场试验技术等方面开展科学试验研究取得的新成果,又吸纳了一批大型的、工程地质条件较为复杂的岩土锚固工程实例,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科研、设计与施工的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

锚固技术在岩土工程中的应用/苏自约等主编. —北京:人民交通出版社,2006.11
ISBN 7-114-06128-5

I. 锚… II. 苏… III. 岩土工程-锚固-学术会议-文集 IV. TU472-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第097033号

MaoGu JiShu Zai YanTu GongCheng Zhong De Ying Yong

书 名:锚固技术在岩土工程中的应用

主 编:苏自约 陈 谦 徐祯祥 刘 璇

责任编辑:吴有铭(wym64298973@126.com)

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:北京牛山世兴印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:32.25

字 数:808千

版 次:2006年11月 第1版

印 次:2006年11月 第1次印刷

书 号:ISBN 7-114-06128-5

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)

《锚固技术在岩土工程中的应用》
编 审 委 员 会

主任委员：徐楨祥

委 员：（按姓氏笔画排列）

丁永贵 王建宇 田裕甲 刘玉堂

闫莫明 何 伟 陈 谦 李成江

李志谦 何益寿 张 雁 杨林德

贺长俊 钟瑞辉 陶 义 韩学广

主 编：苏自约 陈 谦 徐楨祥 刘 璇

序 言

桂林，一座风景秀丽又极具人文底蕴的文化古城，她以典型的喀斯特地形地貌构成了别具一格的桂林山水，并以其独特的山青、水秀、洞奇、石美的“四绝”而享有“山水甲天下”的美誉。今天，中国岩土锚固工程协会第十五次全国岩土锚固学术研讨会在这样一座美丽的城市召开，我们期盼，本次学术交流的成果会像桂林的山水一样给大家留下美好的回忆。

本次论文集入选的 81 篇论文是从 90 余篇应征论文中经编审委员会的专家审阅后确定的。与往次送审的论文相比，本次论文在内容上又有了不少新理念和新思路。所有论文都在工程应用方面做了大量工作。目前，预应力锚索工程技术在我国水利水电工程中的应用数量是最大的，技术也是十分先进的。继三峡工程以后，小湾、锦屏、溪洛渡、向家坝、大华桥等大型水电站以及规划中的怒江流域梯级水电站都在积极建设和待建之中。在收录的论文中，有一部分论文反映了在水电站修建过程中所采用的新型锚固技术以及采取先进、实用的造孔技术解决了高大边坡和破碎岩层中的难题等方面的内容。实践证明，先进技术的研究和采用对大型工程建设的成功是一个关键的因素。

监控量测和信息化技术历来是在地下工程中广泛采用的核心技术之一，它对工程安全和设计验证起到了重要作用。随着监测技术的发展，在诸如高边坡和深基坑工程的设计施工中也越来越多地用现场监测信息技术进行工程指导，并取得了显著效果。一些论文中除了介绍实际监测对锚固工程的作用以及方法的改进之外，还在实测数据的基础上采用反分析方法对岩土体的力学参数进行了研究。

岩土锚固工程施工技术问题是岩土锚固技术领域永久的课题，这也反映了当今的施工技术水平还处在有待切实提高的现状，尽管近 10 年来已取得了长足的进步，但是它在技术层面的发展尚留有很大空间。部分论文以实际工程为背景提出了关于拉力分散型、压力分散型、剪力分散型锚索，抗浮锚杆以及复合式锚杆等的新施工理念和方法。新施工方法的研究无疑会对推动锚固技术的发展起到积极的作用。

在实用性极强的岩土工程中，理论研究工作往往没有被放在它应有的地位上。同样地，在岩土锚固工程的研究领域中也大致如此。但令人高兴的是，在本次和上次的应征论文中有一批关于岩土锚固作用机理、各类锚杆设计理论、岩土体中锚杆受力及稳定性评价、锚固工程设计与分析的计算机软件和数值模拟、模糊数学方法的应用等方面的论述，而且无一不是以实际工程为背景。上述成果使我们在解决具体设计问题、验证工程稳定性以及丰富岩土锚固设计理论方面又迈出了坚实的一步。综上所述，本次论文内容丰富、实用性强，读后令人耳目一新。

每年一次的岩土锚固学术研讨会和每两年出版的一本学术论文集凝结了全体协会会员和广大工程技术同行们的研究心血和创新成果。为了使岩土工程和锚固技术水平得到稳步的提高，也使岩土锚固工程协会在推动新技术发展的事业中具备更强的凝聚力，我们希望这

个已有了 18 年历史的学术交流活动能持续地发展和坚持下去，为全体会员提供一个长期的学习、交流、展示和提高的平台，最终为使岩土锚固技术在工程建设中发挥重要作用而做出贡献。

最后，预祝第十五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

2006 年 11 月

目 录

1 专题综述

我国水利水电工程预应力锚索施工技术的发展	杨俊志等 (3)
预应力锚索锚固段长度的确定方法	刘玉堂等 (11)
矿用单束锚索的新发展	闫莫明 (19)
岩土监测新技术在三峡库区地质灾害监测中的应用	季伟峰 (25)
黄土地层锚固力试验研究	吴 璋等 (29)
锚索框架梁中格构梁内力计算方法的研究	李海民等 (37)
YG 系列全液压锚固工程钻机的研制与应用	罗 强等 (43)
预应力锚索在北京戒台寺滑坡治理中的应用	邓 安等 (50)

2 理论与研究与工程测试

三峡船闸预应力锚索验收试验及成果分析	陈孝英 (59)
模型锚杆腐蚀耦合效应试验研究	曾宪明等 (66)
岩土锚固工程中剪切传递理论的概述及应用	徐禎祥等 (78)
复合土钉支护方案的模糊数学评判	王克明等 (89)
一种计算土钉支护变形的的方法	尹 驥等 (95)
边坡岩体抗剪强度参数的反分析	张志增等 (102)
某公路红层路堑边坡锚杆试验成果分析	张 辉 (111)
抗浮锚杆杆体钢筋轴力测试及分析	王贤能等 (115)
拉力型锚索预应力损失测试与分析	毛根明等 (121)
深港西部通道深圳侧接线地道基坑支护工程施工监测结果及分析	熊德闽等 (125)
深埋大跨度地下硐室动态开挖支护的数值模拟与稳定性分析	张巨伟等 (131)
压力分散型与拉压分散型锚索若干问题的讨论	孙学毅 (137)

3 工程设计与施工技术

深圳益田假日广场建筑抗浮设计	林明博等 (143)
锚固类结构诸界面剪应力相互作用关系与设计方法问题研究	曾宪明等 (149)
YG-80 型锚固钻机在龙滩水电站排水洞内高仰角排水孔施工中的应用	蒋润林 (160)
龙马水电站拉压复合型锚索施工	李云华 (164)
岩土锚固工程锚索张拉力控制的保障体系综述	宋茂信 (171)
岩土锚固施工信息反馈与工程变更	黄晓华等 (176)
丹巴县滑坡应急治理工程预应力锚索施工	吴 胜等 (181)
浅谈断层破碎带止浆岩盘孔口管锚固技术	杨 勇等 (185)
压力分散型锚索在个旧-冷墩高等级公路边坡加固工程中的施工技术	黄如宁等 (191)

一种新型的剪力分散型锚索体系	甘国荣等 (199)
二次劈裂注浆提高软岩锚索承载力的应用与实践	李东平等 (206)
预应力锚索张拉施工特殊情况分析及预防处理措施	刘义等 (211)
西藏羊卓雍湖抽水蓄能电站压力管道补强工程锚索施工	康东等 (216)
回填砂卵石层预应力锚索施工	侯锦等 (220)
注浆效果检测方法综述	徐恒国等 (224)

4 边坡加固与滑坡治理

露天矿边坡预应力锚索加固分析与稳定性预测	高谦等 (235)
预应力锚索在高速公路古滑坡体加固工程中的应用	何伟等 (241)
预应力锚索在山区高速公路路基挡墙加固处治中的应用	汤永福等 (245)
景洪水电站右岸坝肩锚索施工技术	李彦臣 (249)
高危边坡综合治理初探	王晗 (253)
无黏结预应力锚索在泗南江水电站边坡处理中的施工技术	陈正聪等 (258)
土层锚杆在天津市海河堤岸改造工程中的试验	王根柱 (265)
某高速公路水害高填方路堤综合处治工程实例	卢杰等 (269)
北京延庆县古崖居遗址危岩体加固	王桢等 (273)
李家峡水电站泄洪雨雾区边坡塌滑堆积体综合治理工程实例	侯延华 (278)
小净距隧道洞口古滑坡处治方案探讨	张昌勇等 (282)
内蒙古准格尔旗某膨胀土高边坡病害的治理	王桢等 (288)
磁器口古镇边坡的稳定性分析	侯跃峰等 (292)
巴贡水电站厂房高边坡动态加固中的几个问题	黄福德等 (297)
景观建设与生态恢复相结合的边坡绿化技术在工程中的应用	孙旭明等 (302)

5 基坑支护与基础工程

锚固技术在地铁基坑工程中的应用	贺美德等 (311)
双排桩支护结构性状分析及优化设计	初振环等 (318)
深圳农科广场基坑东侧险情实录	王贤能等 (327)
组合支护结构在深基坑工程中的实践	尹文斌等 (333)
管井法在龙威大厦深基坑降水中的应用	杜荣忠等 (338)
深基坑开挖支护三维数值仿真分析稳定性评价	高谦等 (344)
桩锚支护体系在北京地铁深基坑中的应用	傅春青等 (352)
桩锚复合支护体系在龙威大厦深基坑中的应用	杜荣忠等 (358)
土钉复合预应力锚索在深基坑支护工程中的应用	丁振明等 (364)
广州地铁三号线天河客运站深基坑施工技术	李大建 (369)
深基坑锚杆抗拔试验与成果分析	张俊等 (375)
区间盾构隧道范围内的基坑支护锚索综合处理技术	傅春青 (379)

6 隧道与地下工程

琅琊山蓄能电站地下厂房预应力锚索施工技术浅析	孙永吉等 (389)
------------------------------	------------

广西龙滩水电站地下厂房高精度对穿锚索孔施工技术	赵其苏等 (397)
隧道工程地下水监测和岩体注浆有关问题探讨	梅志荣 (401)
小湾电站地下厂房岩锚吊车梁开挖施工参数的优化	孙林中 (406)
金川二矿区 1178m 分段巷道预应力锚索支护参数优化	王永才等 (412)
采场巷道综合控制技术及其在金川二矿区的应用	高建科等 (421)
隧道斜井断层破碎带支护技术探讨	杨 勇等 (429)
φ 600 管棚在隧道穿越既有地铁工程中的应用与分析	姚海波等 (435)
砂层注浆长管棚施工技术研究	黄明利等 (446)
浅埋暗挖隧道邻近古文物施工技术分析	路 威等 (451)
超前深孔注浆技术在隧道重叠段的应用	黄树炉等 (455)
岩土锚固技术在地铁抗浮工程中的应用	张晓丽等 (459)
基于霍氏理论计算的软岩回采巷道支护方案设计	张宝安 (465)
软弱高地应力隧道施工的围岩变形控制	张顶立等 (469)
齐岳山隧道穿越高压富水宽张裂隙注浆堵水施工技术	彭 峰 (474)

7 施工机具与工程材料

PQG 型偏心跟管钻具的研制及应用	朱国平等 (483)
GFRP 锚杆在公路边坡的试验研究	李 明等 (489)
不良地质条件下三联式钢花管注浆锚杆的研制与应用	郝校红等 (497)
树脂锚固剂在岩土工程中的应用	卢须芬等 (501)

1 专题综述

我国水利水电工程预应力锚索施工技术的发展

杨俊志 陈修星 冯杨文

(四川准达岩土工程公司)

摘 要 本文介绍了水利水电工程锚索施工技术的发展与应用情况,尤其是复杂地质条件下的锚索类型选用及施工技术。本文亦揭示了拉力型预应力锚索锚固段呈“各个击破”趋势,自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索改善了锚固段应力集中状况,解决了锚索防腐问题,永久支护效果良好。

关键词 预应力锚索 单孔多锚头锚索 防腐型预应力锚索 跟管钻具

1 我国水利水电工程预应力锚索发展特点

随着近年来水利水电工程建设的迅速发展,施工及设计部门顺应时代发展及技术进步,不断采用新工艺、新方法,在锚固体系的理论研究、技术创新、应用范围等方面取得了一系列新成果,锚固技术日益成熟,表现出以下特点。

(1) 应用领域与范围扩展迅速

水电工程施工中,无论新坝建造和旧坝加固,预应力锚固技术已经成为经济有效的处理方法。我国从 20 世纪 60 年代在梅山水库采用预应力锚索对右岸坝基进行加固,70 年代扩展到对闸墩和地下洞室的加固。近年来,预应力锚索广泛应用于水利水电、建筑、煤炭、交通等行业领域的边坡加固治理工程中,尤其是水利水电工程,广泛应用预应力锚固技术进行高陡边坡、地下洞室、大坝基础、大型弧门闸墩、压力隧洞环锚式预应力衬砌以及其他水工建筑物等的加固,并取得良好的应用效果。

(2) 预应力锚固体系的研制取得新突破

压力分散型、拉压复合型等新型锚索的出现及应用,特别是自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索(四川准达岩土工程公司研制,已获得专利)的出现,改变了以往的传统普通拉力型锚索因其对锚固段地层条件要求高而不适用于破碎软弱地层的传统观念。自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索对复杂地层适应能力强、有效防腐的特点更能适应水利水电等施工领域永久锚固的需要。

(3) 大吨位、超深孔锚索施工水平日益提高

预应力锚索单孔锚固力的提高,可在一定程度上提高预应力锚索利用率,降低锚索造价。锚索荷载大多为 1000~3000kN,20 世纪 80 年代后期丰满电站锚索荷载提高到 6000kN,90 年代石泉电站锚索荷载提高到 80000kN,20 世纪末李家峡电站锚索荷载提高到 10000kN。

锚索施工深度也是我国锚索施工水平的标志之一。根据锦屏水电站工程需要,2005 年四川准达岩土工程公司施工完成了孔径 $\Phi 165\text{mm}$ 、3000kN 级自由式单孔多锚头防腐型预应

力锚索，成孔深度达到 120m，创造了我国锚索施工领域的又一项创新纪录。实践表明，我国水利水电领域的大吨位、超深孔锚固施工技术正在日益成熟。

(4) 标准化建设日益完善

为指导我国水利水电预应力锚固技术快速健康发展，水利水电施工规范逐步完善，对我国预应力锚索施工起到了指导作用，但随着一些新技术新设计理念的更新，各个规范仍然需要进一步完善和发展。

2 预应力锚索锚固体系的研究与发展

2.1 钢绞线

钢绞线分为有黏结钢绞线和无粘结钢绞线（图 1）。锚索用钢绞线执行《预应力混凝土用钢绞线》（GB/T 5224）标准。有黏结钢绞线经防腐油脂敷裹及 PE 套包裹即成为无黏结钢绞线。

无黏结钢绞线被防腐油脂敷裹且外裹 PE 套，钢绞线可在 PE 套内自由伸缩移动；钢绞线与外界有效隔离开，有利于保护钢绞线免受外界地下水等的侵蚀。

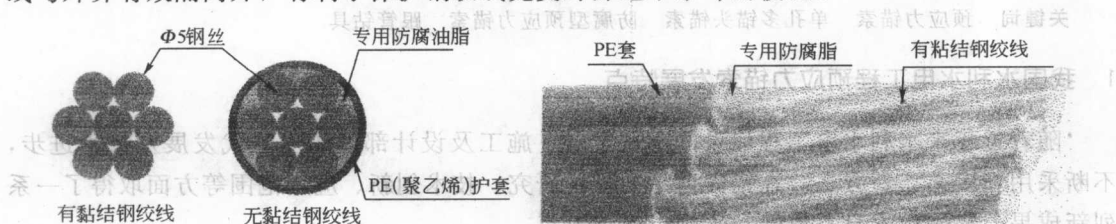


图 1 钢丝线示意图

(1) 有黏结钢绞线

早期的预应力锚索多采用有黏结钢绞线，锚固注浆须采用二次注浆工艺，即先进行锚固段注浆，张拉后再进行自由段注浆。此种方法，必须在锚固段与自由段交界处附近的锚索体上设置阻浆包或阻浆塞以防止浆液进入自由段内。

从锚固段结石体的密实度上讲，这种方法难以保证锚固段结石体的密实度，这对锚固体的抗渗、防腐十分不利；从阻浆（止浆）效果上讲，并不是一阻（止）就灵，浆液进入自由段是不可避免的。这样不仅水泥结石体强度不易得到保证，而且锚索分二次注浆，从工期上讲亦会增加施工时间。

(2) 无黏结钢绞线

近年来，预应力锚索已更多地选用无粘结钢绞线，其优点如下：

① 锚索注浆采用全孔一次注浆工艺，增加锚固段结石体的密实度，提高锚固效果，延长锚固寿命，又简化了工序，节约了成本，提高了进度。

② 钢绞线受防腐油脂及 PE 护套保护，使得锚索的防腐性能大大增强。

③ 可进行二次补偿张拉。任何预应力锚索都存在钢绞线的松弛，预加锚固载荷存在损失 (ΔP_i) 是必然的。当 ΔP_i 大于设计允许预加荷载损失量时，能再次补偿张拉，保证设计锚固永久承载力。

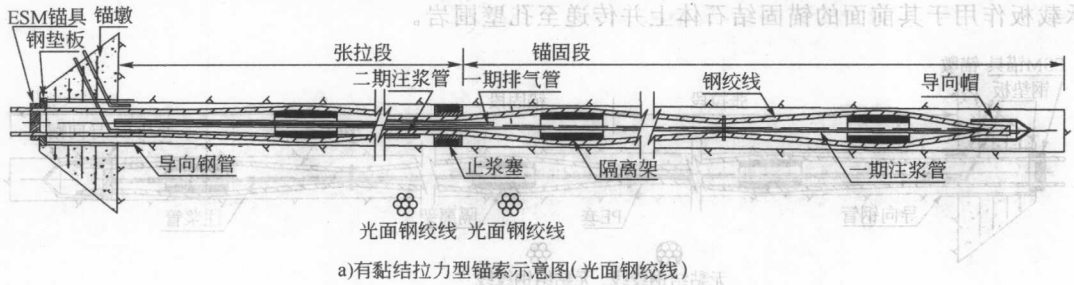
(3) 环氧涂层无粘结钢绞线

环氧涂层无黏结钢绞线是采用静电喷涂工艺在钢绞线表面形成致密牢固的环氧树脂层而成。由于成本等因素，环氧涂层无黏结钢绞线的推广使用尚需进一步研究。

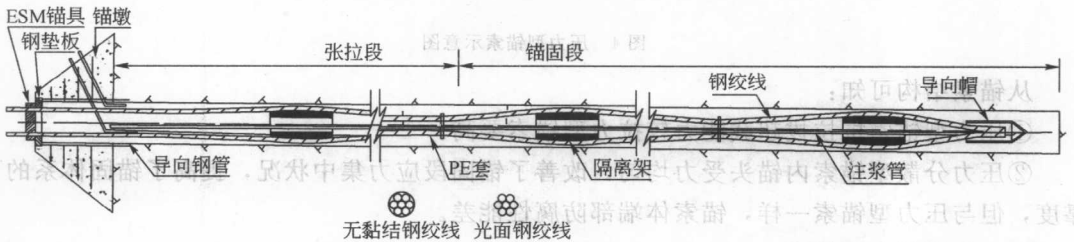
2.2 预应力锚索类型

近年来, 预应力锚索已由拉力型锚索发展为拉力分散型锚索、压力(分散型)锚索、拉压复合型锚索、自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索等类型。

(1) 拉力型锚索 拉力型锚索按使用钢绞线不同分为有黏结拉力型锚索和无黏结拉力型锚索两类(图2)。无论采用何种钢绞线, 拉力型锚索锚固段钢绞线均需与浆液结石体相黏结。



a) 有黏结拉力型锚索示意图(光面钢绞线)



b) 无黏结拉力型锚索示意图(无黏结钢绞线)

图2 拉力型锚索示意图

由锚索结构可知, 拉力型锚索存在锚固段应力集中及锚索防腐性能差等问题。

① 拉力型锚索张拉时, 孔壁剪应力只作用在锚固段前端一定范围, 离开前端稍远处孔壁剪应力便急剧减小并迅速趋向于零。因此, 锚固段前端应力集中严重, 呈现“各个击破”趋势。

② 一旦锚固结石体遭到破坏, 钢绞线将“暴露”, 其被地下水侵蚀将难以避免。

(2) 拉力分散型锚索

拉力分散型锚索多使用2组及以上的无黏结钢绞线组, 每组无黏结钢绞线按一定长度剥去PE护套并清洗干净, 以便与水泥结石体胶结(图3)。各组钢绞线的锚固位置因钢绞线长度不同而沿锚固段分散分布, 使荷载得以分散。

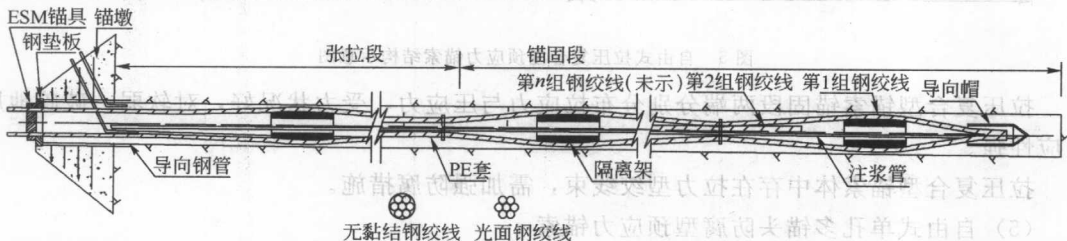


图3 拉力分散型锚索示意图

从锚索结构可知，拉力分散型锚索尽管在某种程度上改善了锚固段应力集中状况，但与拉力型锚索一样，防腐性能差。

(3) 压力（分散）型锚索

压力（分散）型锚索采用无黏结钢绞线，通过挤压锚及承压板将锚索张拉力传递至锚固结石体转变成压力。压力型锚索由1组承压板承载（图4），压力分散型锚索由2组及以上承压板分别承受一定荷载。压力分散型锚索张拉时，总张拉力被分散至各组承载板上，通过承载板作用于其前面的锚固结石体上并传递至孔壁围岩。

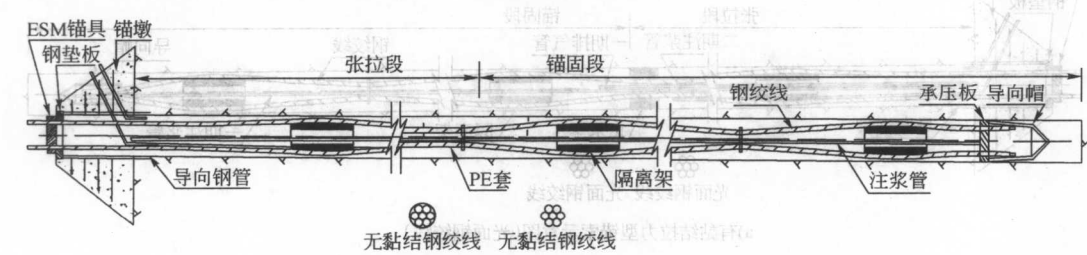


图4 压力型锚索示意图

从锚索结构可知：

- ①压力型锚索抗拉拔超载能力较拉力型锚索要高。
- ②压力分散型锚索内锚头受力均匀，改善了锚固段应力集中状况，提高了锚固体系的可靠度，但与压力型锚索一样，锚索体端部防腐性能差。

(4) 拉压复合型锚索

自由式拉压复合型预应力锚索（简称“拉压复合型锚索”），由四川准达岩土工程公司开发研制，已获得专利。锚固段锚索体由拉力型绞线束与压力型绞线束编制加工而成（图5）。拉应力和压应力在内锚固段相互叠加，使得锚固体内应力及锚固体与周边土体间的粘结摩阻应力均匀分布，大幅度降低应力峰值。

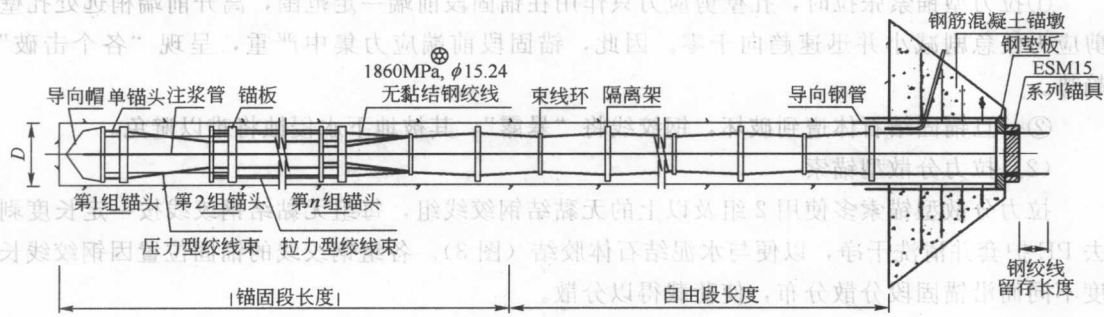


图5 自由式拉压复合型预应力锚索结构示意图

拉压复合型锚索锚固段两端分别分布拉应力与压应力，受力状况好，对软弱、破碎地层适应性强。

拉压复合型锚索体中存在拉力型绞线束，需加强防腐措施。

(5) 自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索

为有效解决锚索锚固段应力集中状况及锚索防腐问题，四川准达岩土工程公司开发研制了新型锚索——自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索。

自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索结构见图 6，主要由导向帽、单锚头、锚板、注浆管、高强低松弛无黏结钢绞线等组成。

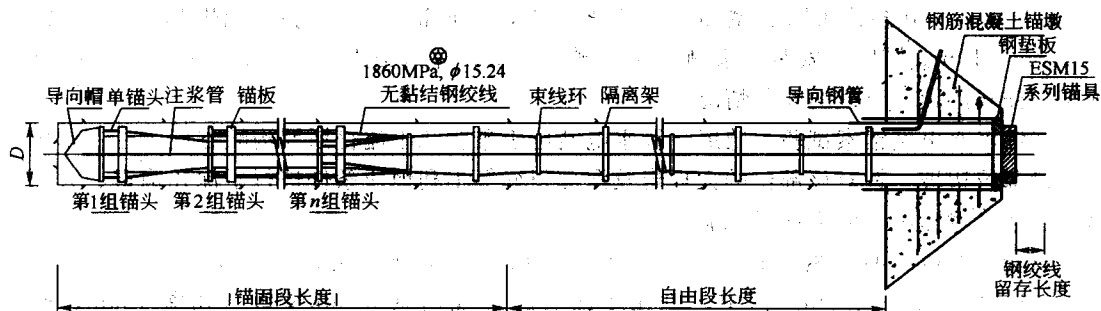


图 6 自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索结构示意图

自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索基本结构特点如下：

①基本（防腐）单元

单锚头。单锚头由无粘结钢绞线、挤压套及其密封套组件组成，具有良好的防腐性能。

②单孔多锚头结构：一根锚索由多组锚头构成，每组锚头包括锚板、单锚头，锚头数目及组合结构根据工程地质特性和锚索吨位大小进行选择。

③整体性锚头结构：各组锚头连接成为一个整体。

单孔多锚头防腐型结构克服了拉力型锚索应力集中和拉压复合型和压力分散型锚索防腐性能差的弱点，具有克服锚固段应力集中、有效防腐、有效减小孔径、全孔一次注浆、可进行二次补偿张拉等特点，因此，该锚索对复杂地层适应性强。

2.3 锚索类型对比试验

为获得不同类型锚索锚固段应力实际分布情况，为锚型选择提供客观依据，亦为锚固段应力分布的认识积累资料以达到提高和促进我国预应力锚固技术水平的目的，四川准达岩土工程公司结合工程实际先后进行了多次锚索试验。

(1) 锚索试验简况

①瀑布沟水电站预应力锚索试验。瀑布沟水电站位于大渡河中游，区内两岸谷坡陡峻。岩体断层及构造裂隙发育，卸荷强烈，岩体完整性差。在左岸泄洪洞出口附近边坡结合永久边坡锚索进行了 1000kN、2000kN、3000kN 级拉力型、单孔多锚头防腐型预应力锚索对比试验，共布置锚索 22 根，锚索孔径分别为 $\phi 115\text{mm}$ 、 $\phi 140\text{mm}$ 、 $\phi 165\text{mm}$ ，深度 40~60m，锚索孔方向下俯 5° 。

试验结合现有成果，有选择性、有针对性进行，着重对锚索新结构、新材料进行适应性方面的试验。根据要求，亦进行了水泥结石体与钢绞线、水泥结石体与岩壁黏结强度试验。试验过程中，安装锚索测力计、多点位移计分别进行锚索应力长效监测、边坡变形监测。

②紫坪铺水利枢纽工程边坡锚索试验。四川省紫坪铺水利枢纽工程边坡地质条件复杂，岩性为砂岩、泥质粉砂岩与煤质页岩互层，含煤层，强卸荷、岩体破碎。为进一步分析研究自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索、拉力型锚索锚固段应力特性，在引水隧洞进口边坡布置试验锚索 6 根，单根长 50m，3000kN 级。

拉力型预应力锚索 3 根，6m、8m、10m 锚固段长锚索各 1 根，每根锚索锚固段均布设

应变元件（电阻应变片式水泥浆应变块，与锚固段水泥结石体具有相似的力学性能指标且能与水泥结石体良好胶结为一体）测试锚固段应力情况，应力测试范围分别为 6m、8m、10m；自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索 3 束，每根锚索均进行应力测试，范围分别为 6m、8m、10m。同时，安装锚索测力计监测拉力型预应力锚索和自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索的锁定荷载的变化情况。

③锦屏水电站锚索试验。锦屏一级水电站位于雅砻江干流普斯罗沟峡谷段，在左岸导流洞出口部位边坡，针对该部位的大理岩及深部裂缝等不利地质条件进行了深孔锚索、大吨位锚索、锚型对比等预应力锚索试验。

试验布置拉力型锚索 3 根，自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索 6 根，吨位 1000～5000kN，孔深 40～120m。其中，单孔多锚头超常规锚索 3000kN 级（孔深 120m、孔径 $\phi 165\text{mm}$ ）1 根，5000kN 级（孔深 80m、孔径 $\phi 220\text{mm}$ ）1 根。在拉力型锚索（3000kN，深 80m）和自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索（3000kN，深 80m）安设应力测试元件测试锚固段的应力。

拉力型锚索和单孔多锚头锚索分别安设锚索测力计进行锚索应力长效监测。根据要求，亦进行了水泥结石体与钢绞线、水泥结石体与岩壁黏结强度试验。

（2）试验结果

多个试验中单孔多锚头防腐型锚索、拉力型锚索锚固段应力测试的结果基本一致。

①应力分布特点：试验结果表明，拉力型锚索锚固段前端附近的应力测试值很小，说明该处附近水泥结石体发生了破坏。拉力型锚索锚固段存在“各个击破”现象及其应力集中的特征。

单孔多锚头防腐型预应力锚索锚固段应力分布为拉压应力的复合分布，改善了应力峰值，应力分布较为均匀，利于保持锚索的长效锚固。

②结论：由于拉力型预应力锚索存在应力集中，锚固段呈“各个击破”破坏趋势，较难解决防腐等问题，对于永久支护，不宜选用；自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索改善了锚固段应力集中状况，解决了锚索防腐问题，永久支护效果良好。

3 预应力锚索施工技术新进展

通过大量预应力锚索工程实践，在我国水利水电预应力锚索施工领域，复杂地层预应力锚索的施工技术取得了新的进展。

3.1 复杂地层预应力锚索成孔技术发展

施工锚索首先面临的问题是成孔。钻孔施工前，根据具体地质情况和钻孔参数选择合适的钻机、钻具，以及制定最优的钻进工艺规程参数。

就岩石锚索施工而言，在岩体风化、卸荷程度较弱的地质条件下，锚索孔采用锚固钻机及空压机带动风动冲击器及合金钎头进行冲击回转钻进成孔过程中，基本不存在掉块卡钻情况，钻进效果较好。

对于坡积体、堆积体、覆盖层等复杂地层，成孔过程中，掉块卡钻严重，起钻塌孔严重，难以成孔。因此，复杂地层锚索的成孔质量及效率是影响锚索施工进度的重要因素。

（1）复杂地层成孔方法选择

四川准达岩土工程公司根据多年水电工程复杂地层锚索施工经验，制定了各种复杂地层