

# 我国预应力岩土锚固技术的现状与发展

苗国航

(中国冶金地质勘查工程总局, 北京 100028)

**[摘要]** 预应力岩土锚固技术是深基坑、地下工程、隧道、道路边坡、坝基、桥梁等工程中重要的支护手段之一, 全面剖析了这项技术在理论研究、应用领域、规模、标准化建设、锚固材料及施工机具等突破性进展, 根据我国基础施工现状, 对锚杆的设计、锚固参数合理选择、锚杆的腐蚀与防护进行了分析, 从8个方面指出了预测应力岩土锚固技术的研究方向。

**[关键词]** 预应力 锚固技术 锚杆

**[中图分类号]** TU757 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2003)03-0091-04

## 0 前言

预应力岩土锚固技术产生于20世纪初的英国, 因其巧妙利用了预应力钢材的高抗拉强度和调用并提高了岩土体自身的强度及自稳能力, 充分挖掘了岩土体的潜能, 有效地节省了工程费用并有利于施工安全, 成为提高岩土工程稳定性和解决复杂困难岩土工程问题的最经济最有效的方法之一。

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, 广泛应用预应力锚杆以抵抗地下水的浮力。纽约世界贸易中心深基坑(21 m)工程采用6排地连墙和工作荷载3000 kN 预应力锚杆支护结构取得成功。英国、日本等国研究开发了单孔复合锚固技术, 改善了预应力锚杆的传力机制和锚固段粘结应力分布状态, 大大提高了锚杆的承载能力和耐久性。英国采用单孔复合锚固技术在软土中锚杆承载力达到1337 kN。1989年, 澳大利亚在warragamha重力坝加固工程中采用65根直径15.2 mm的钢绞线组成的预应力锚杆, 极限承载力达16500 kN。90年代以来, 英国、澳大利亚、加拿大等国的学者和工程师提出了“注浆锚杆的侧向刚度、注浆体长度及膨胀水泥含量对杆体与注浆体界面特性的影响”、“有侧限状态下注浆锚杆的特性”、“粘结应力分布对地层锚杆设计的影响”、“单孔复合锚固的理论与实践”等理论研究成果。

我国预应力岩土锚固技术从1964年首次在安

徽梅山水库大坝基础成功地运用设计承载力2400~3200 kN的预应力锚杆加固开始, 相继在丰满、隔河岩、小浪底、三峡、水布垭、京九铁路等边坡工程、滑坡整治工程和城市基坑支护工程、结构物的抗倾、抗浮工程中获得了广泛应用并取得良好的效果。1989年我国首台6000 kN级预应力锚杆及张拉设备研制成功, 并应用于丰满大坝加固工程, 8000 kN级预应力锚杆在石泉大坝加固工程应用成功, 10000 kN级预应力锚杆在龙羊峡水电工程中试验成功。北京王府井饭店等大型深基坑工程广泛应用了预应力土层锚杆背拉桩墙支护结构。

90年代以来, 我国的预应力岩土锚固技术从理论研究、技术创新、工艺改良、材料开发、设备配套到工程应用都得到了飞速发展。据初步统计, 我国在深基坑和边坡加固工程中的预应力锚杆年用量达2000~3500 km。理论研究主要围绕地层锚杆的荷载传递机理, 浆体与地层间的粘结应力及其分布状态, 单孔复合锚固的机理, 锚杆腐蚀与防护、锚杆长期工作性能测试等几方面展开的, 目前岩土预应力锚固的理论和实践已提高到一个新水平。

## 1 岩土预应力锚固技术的现状

### 1.1 应用领域和规模不断扩大

伴随着我国高强低松弛钢绞线的批量生产和灌浆技术的发展, 长度大于15 m设计荷载大于500 kN的预应力锚杆在我国边坡稳定、地下洞室支护、

**[收稿日期]** 2002-12-11; **[修订日期]** 2003-03-10; **[责任编辑]** 李石梦。

**[作者简介]** 苗国航(1964年-), 男, 1989年毕业于东北大学, 获硕士学位, 高级工程师, 现主要从事岩土技术研究、岩土类杂志编辑、企业管理等工作。

深基坑支护、坝基加固和抗倾覆、抗浮结构等工程中广泛应用(表 1),标志着我国岩土预应力锚固的设计、材料、施工水平进入了新的阶段。

表 1 预应力岩土锚固工程实例

| 工程名称     | 用途   | 类型       | 承载力/kN      | 钢绞线      | 钢绞线规格/mm | 孔径/mm     | 孔深/m        | 施工年代/a      |
|----------|------|----------|-------------|----------|----------|-----------|-------------|-------------|
| 小浪底水利枢纽  | 边坡加固 | 拉力型      | 1000 ~ 3000 | 7 ~ 19 根 | 15.24    | 150 ~ 220 | 20 ~ 55     | 1995 ~ 1996 |
| 链子崖危岩体加固 | 边坡加固 | 拉力型      | 1000 ~ 3000 | 7 ~ 19 根 | 15.24    | 115 ~ 175 | 16.5 ~ 51   | 1995 ~ 1997 |
| 三峡水利枢纽   | 边坡加固 | 拉力型      | 1000 ~ 3000 | 19 根     | 15.24    | 130 ~ 176 | 30 ~ 60     | 1995 ~ 2001 |
| 中银大厦     | 基坑支护 | 压力分散型    | 800         | 8 根      | 12.7     | 133       | 22 ~ 32     | 1998        |
| 北京东方广场   | 基坑支护 | 拉力型      | 0           | 多根       | 15.24    | 150       | 20 ~ 28     | 1999        |
| 江苏淮安三线船闸 | 结构锚固 | 分散压力型    | 223 ~ 823   | 6.9 根    | 12.7     | 168       | 22.5 ~ 27.5 | 2001        |
| 清江水电站    | 边坡锚固 | 拉力型分散压力型 | 1000 ~ 3000 | 7 ~ 21 根 | 15.24    | 130 ~ 180 | 30 ~ 50     | 正在施工        |

举世瞩目的长江三峡水利枢纽双线连续五级船闸主体段长 1617 m,人工开挖形成了 170 m 高的风化程度不等的花岗岩边坡,采用 229 根 1000 kN 级、1937 根 3000 kN 级的系统预应力锚杆改善边坡岩体的应力状态,抑制开挖边坡塑性区的扩展,提高边坡的整体稳定性;采用 2080 根 3000 kN 级随机预应力锚杆对边坡潜在不稳定块体进行了加固;采用 121 根 3000 kN 级预应力锚杆对闸首支持体进行了加固。

江苏淮安三线船闸闸首为钢筋混凝土整体结

构,闸室采用永久钢板桩加墙后预应力土层锚杆的新颖结构形式。闸室与上下闸首衔接段采用三层预应力土层锚杆支护,闸首闸室标准段采用两排预应力土层锚杆支护。由于本工程地质条件复杂,土质松软且离散性较大,锚杆形式选用分散压力型(无黏结钢绞线),成孔采用全长套管跟进成孔工艺,注浆采用二次高压注浆工艺(即一次常压注浆和二次高压劈裂注浆工艺)等综合技术工艺措施来提高锚杆的极限承载力和耐久性。江苏淮安三线船闸土锚设计参数见表 2。

表 2 江苏淮安三线船闸土锚设计参数表

| 参数部位    | 孔径/mm | 倾角/° | 孔深/m | 锚杆长度/m |      |     | 钢绞线规格/mm | 锚具规格  | 承载体数量/个 | 承载体间距/m | 设计荷载/kN | 极限荷载/kN |
|---------|-------|------|------|--------|------|-----|----------|-------|---------|---------|---------|---------|
|         |       |      |      | 总长     | 自由段  | 锚固段 |          |       |         |         |         |         |
| 闸室标准段   | 168   | 15   | 23.5 | 23.5   | 13.5 | 10  | φ12.7    | OVM13 | 2       | 5       | 164.3   | 328.6   |
|         | 168   | 15   | 27.5 | 27.5   | 7.5  | 20  | φ12.7    | OVM13 | 4       | 5       | 367.1   | 734.2   |
| 闸室与上闸首段 | 168   | 15   | 23.5 | 23.5   | 13.5 | 10  | φ12.7    | OVM13 | 2       | 5       | 116.5   | 223.0   |
|         | 168   | 15   | 23.5 | 23.5   | 7.5  | 16  | φ12.7    | OVM13 | 4       | 4       | 202.5   | 405.0   |
| 闸室与下闸首段 | 168   | 15   | 22.5 | 22.5   | 6.5  | 16  | φ12.7    | OVM13 | 4       | 4       | 176.9   | 353.8   |
|         | 168   | 15   | 26.0 | 26.0   | 16.0 | 10  | φ12.7    | OVM13 | 2       | 5       | 150.7   | 301.4   |
|         | 168   | 15   | 25.5 | 25.5   | 7.5  | 18  | φ12.7    | OVM13 | 4       | 4.5     | 362.8   | 798.6   |
|         | 168   | 15   | 24.5 | 24.5   | 6.5  | 18  | φ12.7    | OVM13 | 4       | 4.5     | 414.4   | 828.8   |

1.2 标准化建设日趋完善

1986 年颁发了国标《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GBJ86 - 85),2001 年颁发了其修订版 GB50086 - 2001,1990 年颁发了《土层锚杆设计施工规范》(CECS22:90),2002 年起开始对 CECS22:90 进行修订。1997 年颁发的《建筑基坑工程技术规范》(YB9258 - 97)第 7 章、1999 年颁发的《建筑基坑工程技术规程》(JGJ120 - 99)第 4 章、1998 年颁发的《水工预应力锚固设计规范》(SL212 - 1998)、

1994 年颁发的《水工预应力锚固施工规范》(SL46 - 1994)都对预应力锚杆的适用范围、设计、材料、施工、防腐、试验和监测作了明确的规定。规范将锚杆按其服务年限分为临时性锚杆(2 年以下)和永久性锚杆(2 年或 2 年以上),锚杆设计采用统一的安全系数。对锚杆的试验分别规定了基本试验、蠕变试验和验收试验的锚杆数量、最大试验荷载、加荷等级及观测时间,并规定了锚杆验收的合格标准,即锚杆除应在最大试验荷载作用下,锚头位移趋于稳定其

蠕变量不大于 2.0 mm 外,从 50% 拉力设计值到最大试验荷载之间测得的总位移量应当超过该荷载范围自由段长度预应力筋理论弹性伸长值的 80%,且小于自由段长度与 1/2 锚固段长度之和的预应力筋的理论弹性伸长值。

### 1.3 锚杆材料与施工机具有新的发展

目前我国的预应力钢材向高强度、大直径方向发展,数十家单位均能生产高强度(1860 MPa)低松弛的有粘结或无粘结直径为 12.7 mm、15.24 mm 的钢绞线及配套的锚具和张拉设备。随着制造工艺的不断改进和提高,江西新余、上海申佳金属制品有限公司、江阴钢绞线厂等单位已能生产强度 2000 MPa 的超高强低松弛钢绞线和直径 17.78 mm 的 1860 MPa 钢绞线,柳州 OVM、HVM 建筑机械有限公司生产出与之配套的锚具,为我国高承载力锚杆的应用提供了良好的物资基础。柳州 OVM 建筑机械有限公司已能批量生产环氧静电喷涂钢绞线,这是一种具有优异防腐性能的全新的防腐钢绞线,它利用先进的高环保无污染高压静电喷涂工艺,对构成钢绞线的芯线和外周的六根侧线的表面都均匀地喷涂上专用环氧树脂粉末并加热熔融及冷却固化,在钢绞线的每根钢丝表面形成一层致密的环氧隔膜,防腐性能明显优于镀锌钢绞线,能大幅度提高钢绞线的使用寿命。另外,国内已能生产各种规格的具有标准连接螺纹的中空筋材,为采用自钻式锚杆提供了物质保证。

除从国外引进一些较先进的全液压双动力钻孔机外,我国生产的岩锚钻机和配套的钻具均具有良好的工作性能,基本满足了目前我国岩土预应力锚杆施工的钻孔要求。另外合资生产大风量高中低风压的英格索兰、阿特拉斯、美国寿力、台湾复盛等螺杆式空气压缩机,可为岩锚钻机提供充足强劲的动力。

### 1.4 预应力岩土锚固理论、技术研究取得重大进展

近几年来,在预应力岩土锚固理论、技术研究围绕着锚杆荷载传递规律、不同受力机理、复合土钉墙、自钻与单孔复合锚固理论、可重复灌浆技术、锚杆可拆芯性、锚杆的抗腐蚀性、高效钻孔设备的研制、锚杆孔斜控制等方面取得了重大进展。从改善锚杆荷载传力机制出发,在一个钻孔中安放多个单元锚杆的复合锚固系统,使粘结应力较均匀地分布于整个锚固段长度上,可拆芯;采用特殊的注浆装置及适宜的工艺参数,对锚固段的二次或多次高压重复灌浆术,使浆液从第一次灌浆体中劈裂向周围地

层挤压、扩散,提高了其抗剪强度并扩大了锚固体的直径,锚杆承载力可提高 0.6 ~ 1.2 倍;掌握了软土地层中锚杆的蠕变性能和预应力值的变化规律;针对三峡水利枢纽永久船闸高边坡预应力锚杆加固工程开展了从钻孔设备、孔斜控制、快速施工、预应力监测到锚固效果的一系列攻关课题,研制了 DKM 型钻机并建立了以支点纠偏为主的高精度深孔钻进技术,多点位移计、声波、钻孔弹模等综合测试技术;开展了带塑料波纹管防护的无粘结预应力锚杆的试验研究;以有限元、边界元、离散元法以及极限平衡为基础的分析软件;GPS、自动光学监测系统。

## 2 对我国预应力岩土锚固技术发展的几点建议

### 2.1 锚杆的设计

锚杆设计中有许多不确定的因素及锚杆施工的隐蔽性,如地层形态、地下水或周围条件的变化;预应力筋和灌浆质量的不确定性;单根锚杆承载力下降或失效引起相邻锚杆工作荷载的增加、腐蚀对锚杆长期工作性能的影响等。因此锚杆设计施工必须严格按规范要求进行。对锚固体的设计,规范作了规定,永久性锚杆安全系数最小为 1.8。笔者认为对于重要工程和复杂地层的永久性预应力锚杆,安全系数不应小于 2.5。目前我国相当多的预应力锚杆取用的安全系数偏低、缺乏按规范要求的验收试验核定工程锚杆是否满足设计采用的安全系数值,对锚杆的长期工作性能将构成严重的威胁。理论和实测表明,锚杆设计中将锚固段长度上的粘结应力视为均匀分布,锚杆承载力与锚固段长度成正比的计算理论是不合理的,应引入锚固长度有效因子,即锚杆承载力的计算公式修改为:

$$T_u = \pi \cdot D \cdot L_m \cdot \psi \cdot q_s$$

式中  $L_m$ — 锚杆的锚固段长度;

$D$ — 锚固体直径;

$\psi$ — 锚固长度有效因子;

$q_s$ — 预应力筋与灌浆体或灌浆体与地层间的粘结强度。

提高锚杆承载力非常重要的途径是改变锚杆结构形式,即在一个钻孔内设置复合锚固体系,不论是压力分散还是拉力分散及其多种组合都是今后预应力锚杆技术发展的方向。此外,温度、风、交通荷载、浅水波浪冲击、爆破震动冲击等交变荷载都会对锚杆产生附加位移和引起锚杆预应力值的变化。必须测定并控制荷载变化的范围。

## 2.2 抗浮锚固技术

目前抗浮锚杆参数的设计、施工及检测尚无专门的现行规范,只能参照现有的地基基础设计规范、港口勘察规程等。抗浮锚杆一般为全长性粘结性永久锚杆,锚固体的摩阻力沿锚杆分布不同,锚头处应力最大,因此,锚杆有一合理长度。根据一些大型工程应用实例和国外有关资料,笔者认为,锚杆土层长度 10~12 m,岩层不小于 3 m,单锚抗拔力 100~300 kN,摩阻力安全系数大于 2.0 锚固体材料应灌注纯水泥浆,破坏标准按有关规范执行,对应锚头总位移应小于 25 mm。地下水浮力应根据当地水文地质条件地下水压力、结构自重以及工程经验等计算。

## 2.3 锚杆耐久性与防护

影响预应力岩土锚杆的耐久性的因素有预应力吨位过大、材质、施工工艺不当和环境腐蚀,最大威胁来自腐蚀,产生腐蚀的原因主要是地层和地下水中的腐蚀介质作用,预应力筋防护系统的失效,双金属作用以及地层中存在的杂散电流。腐蚀形式主要有全面腐蚀、局部腐蚀和应力腐蚀。笔者认为,应针对不同的工程对象和具体的腐蚀环境,采取一系列综合对策,以提高锚杆的防腐能力和长期化学稳定性。主要有:锚杆预应力筋应有塑料管和水泥浆体双层以上的保护层,水泥浆保护层的厚度不应小于 20 mm;尽可能采用压力分散型锚杆;大吨位预应力锚杆锁定荷载不宜超过筋体抗拉强度标准值的 60%;锚杆自由段与锚头结合处的空隙,务必实施二

次补浆并保证灌注密实;张拉作业完成后,锚头应及时封闭防护。

## 2.4 高边坡设计中预应力设定值

由于高边坡多在 30 m 以上,采用分级分层的坡形,并采取分级开挖和支护方法。但预应力锚杆设计中多采用一个设定值,这是不合理的。因为分级开挖过程中已经支护的上几级边坡会产生变形,严重的造成锚杆失效。因此,应根据锚杆在高边坡的位置和开挖过程中的变形,来分级分层考虑预应力设定值。

## 2.5 预应力岩土锚固技术的研究方向

①新型预应力锚杆(分散压力型、分散拉力型、拉压分散型、剪力型、扩体型等)的传力机制和承载力特性;②各类地层中锚杆锚固段粘结应力特性与固定长度有效因子;③轻型、高效、快速与多功能钻孔、测试设备的研发;④各种锚固体系的理论分析和设计计算方法;⑤锚杆的腐蚀与防护;⑥冲击荷载、变异荷载、爆破震动等条件下锚杆的性能;⑦预应力锚杆对岩土体加固效果及加固机理的测试与研究。

[参考文献]

- [1] 程良奎,范景伦,韩 军,等.岩土锚固[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [2] 高大钊.岩土工程的回顾与前瞻[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 王以功,林登阁,柴天星.锚注支护机理及参数优化研究[J].地质与勘探,2002,(6):84~86.

# THE PRESENT SITUATION AND DEVELOPMENT OF PRESTRESSED GEOTECHNICAL ANCHORING TECHNIQUE IN CHINA

MIAO Guo-hang

(China Exploration & Engineering Bureau, Beijing 100028)

**Abstract:** The prestressed geotechnical anchoring technique is one of supports used in deep foundation pits, underground buildings, tunnels, road slopes, dam foundation, bridges and so on. Analyses comprehensively the technique breakthrough progresses in both theory and application, especially in the size, standard and material of prestressed anchors as well as their construction machineries. Through some advices and opinions on the design, rational choose of anchoring elements, and anti-corrosive and protection measures on the basis of our Country's Construction. Point out the Study directions of the prestressed geotechnical anchoring technique in nine respects.

**Key words:** prestress, anchoring technique, present situation and development anchor