

百色水利枢纽发电站厂房边坡治理工程技术

李海民 李 鑫 钟瑞辉

【摘要】 本文通过广西右江百色水利枢纽地下发电厂房进水口与尾水洞高边坡的治理, 主要介绍在此工程中比较特殊的一些施工方法。特别介绍目前我国岩土锚固工程中逐渐推广运用的压力分散型预应力锚索和在实际施工中较少采用的垂直壁悬吊式施工法。希望通过此文, 能为做岩土锚固工作的同仁们起到抛砖引玉的作用, 也为完善我国的岩土锚固工法尽一份力量。

【关键词】 岩土锚固 压力分散型锚索 索体刚度 悬吊式施工 固结灌浆 防护

一、工程概况

(一) 地质情况

根据地质勘探和开挖期地质编录成果, 进水口边坡走向为 N52° E, 倾向 NW。岩层扭曲强烈, 坡体岩石为弱风化硅质泥岩夹泥化夹层、强风化含洞穴硅质泥岩石、强风化硅质岩和全强风化辉绿岩。由于坡体由多种岩层组成, 其岩石强度、水理性质和风化强度相差很大, 边坡结构十分复杂。

尾水边坡地质条件对坡体稳定十分不利, 尤其是在尾水出口部位, 辉绿岩与硅质泥岩接触带有一条大的蚀变带, 强风化~全风化态, 岩性破碎, 属 V 类围岩, 水理性质很差, 遇水很容易引发塌滑, 在边坡开挖期间就曾引起滑坡。

根据此边坡的具体地质情况, 国内有关岩土院士专家认为, 为保证边坡的稳定应分别在尾水边坡的尾水洞洞脸部位和进水口部位布置预应力锚索。

(二) 工程情况

根据设计分析计算, 尾水边坡设 4 束 1000KN 级预应力锚索, 锚索长 27m, 锚孔倾角 0°; 水电站进水口二期开挖边坡共设有四排 44 束预应力锚索, 209.5m 平台一排, 197.5m 平台一排, 197.5m 平台以下垂直壁上两排, 锚索设计锚固吨位

1500KN, 锚索长度分为 45.5m、50.5m、55.5m、60.5m 四种, 锚孔倾角 -5°; 另有 4 束试验锚索(试验后增设为工程锚索) 锚索孔道长度分别为 20m、20m、20m、31m。

本水利枢纽发电站工程由广西水利电力勘测设计研究院设计、四川二滩国际工程咨询有限公司监理、中水十四局承建。柳州 OVM 工程公司进行锚索设计、试验与施工。

二、锚索索体结构设计

根据本边坡工程地质情况的复杂性和整体具有全强风化的特点以及所有工程锚索最终将全部淹没于库水之中, 锚索需要具有较强防护能力的实际情况, 锚索索体型式优先选用压力分散型结构。由于通过进行边坡稳定性分析计算已经确定了每束锚索的自由段长度, 故索体结构设计主要是确定锚固段的长度和结构。

(一) 进水口压力分散型锚索结构设计

锚索设计荷载 $T_d=1500\text{KN}$

锚固体直径 $d_A=150\text{mm}$

锚固段安全系数 $F_S=1.5$

锚固段总长:

$$L_a = \frac{F_s \cdot T_d}{K_1 \cdot K_2 \cdot \pi \cdot d_A \cdot q_s}$$

$$= \frac{1.5 \times 1500 \times 10^3}{0.9 \times 1.2 \times 3.14 \times 150 \times 10^{-3} \times 380 \times 10^3}$$

李海民: 柳州欧维姆工程有限公司 工程师

=11.6(m), 取 $L_a=12m$

式中: K_1 —工程施工折减系数

K_2 —采用压力分散型锚索后岩土体抗剪强度利用率的提高系数

q_s —粘结摩阻强度

锚索钢绞线根数 $m_1 = \frac{T_d}{0.6A \cdot f_{ps}} = 9.6$ 根, 取 $m_1=10$ 根

每个承载体的抗拉拔力 $T_u=780KN$

则承载体个数 $m_2 = \frac{T_d}{0.6T_u} = 3.42$ (个), 取 $m_2=4$ 个

各承载体间间距由内向外设为:

3.6m+3.6m+2.4m+2.4m=12m

(二)尾水主洞脸边坡压力分散型锚索结构设计

锚索设计荷载 $T_d=1000KN$

锚固体直径 $d_A=130mm$

锚固段安全系数 $F_S=1.5$

锚固段总长:

$$L_a = \frac{F_S \cdot T_d}{K_1 \cdot K_2 \cdot \pi \cdot d_A \cdot q_s}$$

$$= \frac{1.5 \times 1000 \times 10^3}{0.9 \times 1.2 \times 3.14 \times 130 \times 10^{-3} \times 380 \times 10^3}$$

=8.95(m), 取 $L_a=9m$ (分三级锚固)

锚索钢绞线根数 $m_1 = T_d / (0.64 \cdot A \cdot f_{ptk}) = 6$ 根

各承载体间间距由内向外设为:

3m+3m+3m=9m

(三)锚索体材料

选用符合 ASTM416-94 标准强度等级为 270 级 $1 \times 7 - \Phi 15.24 - 1860MPa$ 高强度低松弛无粘结预应力钢绞线。

(四)灌浆体强度设计

1、灌浆浆体强度的设计计算 (按受力最大的 1500KN 级三根受力钢绞线上的承载体进行局部承压计算)

承载体承受荷载: $T = (T_d / m_1) \times 3 = 450KN$

承载体承压面积: $S = (\pi D^2 / 4) - 4 \pi \times 0.02^2 / 4 = 3.14 \times (132 \times 10^{-3})^2 / 4 - 0.0012 = 0.0125 (m^2)$

浆体设计强度: $M \geq KT/S = 1.2 \times 450 / 0.0125 = 43.2 (MPa)$

2、灌浆材料配合比设计

水泥选用新鲜普通硅酸盐 525[#], 水灰比 0.38, 外加 10%UEA-Z 的复合膨胀剂和 0.6% 的 UNF-5 高效早强减水剂。此设计配比强度 T_5 可达 50MPa, T_{28} 可达 80MPa, 不但满足了压缩型锚索需要高强度灌浆材料的特点, 而且因其早期强度高, 有效缩短了等待时间, 进而加快了施工进度。

三、锚墩及外锚头设计

(一)锚墩设计

锚墩承压面大小的确定

原设计院提供的锚墩承压面 1000KN 级锚索为 $1.8m \times 1.8m$, 其钢筋网与主筋布设太密, 一个 1000KN 级锚索的锚墩总重约 4.5t。如此大的锚墩悬在垂直壁上, 其施工的难度相当的大。我现场施工部在综合分析实际地质情况和以往的施工经验的基础上, 认为此边坡基础承载力根据地质分析应在 1.2MPa 以上。计算分析如下:

$$\delta = \frac{k \times T_d}{A \times f}$$

$\ell = \sqrt{A} = (1.2 \times 1000 \times 10^3 / (1.3 \times 1.2 \times 10^6))^{1/2} = 0.88 (m)$

式中: δ —岩石承载力 (1.2~1.5MPa)

k —超荷载安全系数取 1.2

T_d —设计锚固力

A —锚墩与岩石理论接触面积

f —岩石变形荷载分散系数取 1.3

ℓ —锚墩底部边长

计算结果正方形锚墩底部边长为 0.88m, 实际按 $1m \times 1m$ 施工。而是否满足实际要求则可在锚索试验中一并进行检验。

锚墩布筋则按局部承压和抗裂进行计算, 此处略。

(二)外锚头设计

外锚头设计包括垫板、锚具以及封锚钢护罩。

百色水利枢纽边坡锚固采用性能卓越, 锚固可靠的OVM锚具(锚固效率系数 $\eta_A \geq 0.95$), 其相应配套垫板、封锚钢护罩等也选用OVM的特殊加工品。

鉴于工程锚索全部将被淹没于库水中, 因此外锚头的防护采用钢护罩内充填环氧砂浆的方式进行封锚。

四、现场锚索试验

为取得现场实际资料与数据, 确定土体的极限承载力, 从而最终确定预应力锚索锚固段的实际长度和结构分布; 同时检验预应力锚索施工工艺, 在锚固工程施工前按有关规范要求进行了锚索的现场基本试验。

为了较准确地确定锚索锚固段的长度, 在试验中4束锚索的锚固段情况是这样布置的: 3束7m; 1束12m。锚索施工工艺完全按照正式的工程锚索施工工艺进行, 且在试验中仅对锚固段部分进行灌浆。试验中的拉拔是采用伸长量补偿法, 用YDC240Q千斤顶进行补偿、用YCW250A千斤顶进行整体张拉的多循环多级次方式。拉拔试验机具组装示意图见图1。

锚索试验加荷等级与观测时间如表1。

表1

加 荷 增 量 ($A \cdot f_{ptk}\%$)	初始荷载	-	-	-	10	-	-	-
	第一循环	10	-	-	30	-	-	10
	第二循环	10	20	30	40	30	20	10
	第三循环	10	30	40	50	40	30	10
	第四循环	10	30	50	60	50	30	10
	第五循环	10	30	50	70	50	30	10
	第六循环	10	30	60	80	60	30	10
观测时间(min)		5	5	5	10	5	5	5

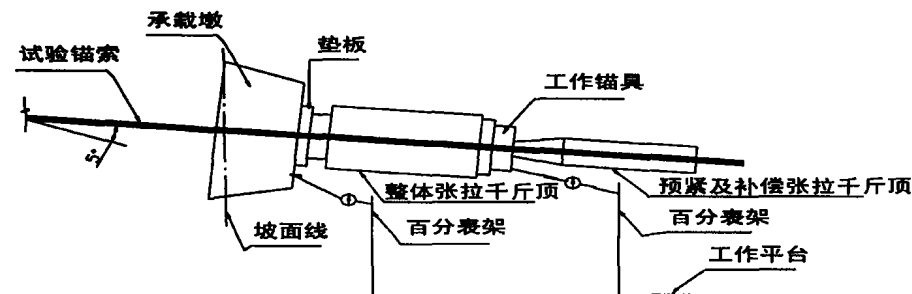


图1 拉拔试验机具组装示意图

1、锚索拉拔试验前, 须对锚孔浆体试块进行抗压试验, 试块强度超过设计要求和承载墩混凝土强度达到试验要求后才进行拉拔试验。

2、锚索拉拔试验张拉控制程序

①拉拔准备: 剥除工作段PE管, 洗净钢绞线, 按图组装好机具。

②先将大千斤顶活塞行程空载打出一定长度, 以便于每一循环结束后退锚, 同时锁死与大千斤顶配套的高压油泵。

③将相应的垫环、工作锚具在大千斤顶上安放好。

④用YDC240Q型千斤顶按承载体由孔底至孔口方向的顺序将每根钢绞线预紧至 $0.1A \cdot f_{ptk}$ 后锁定。

⑤用YCW250A千斤顶整体拉至 $0.1A \cdot f_{ptk}$, 测量初值记录。

⑥用YDC240Q千斤顶将长于基准钢绞线(以离孔口最近的承载体上的钢绞线为基准)的钢绞线进行该循环的下一级加荷补偿, 补偿完一个承载体上的钢绞线后再补偿下一个承载体的钢绞线, 顺序仍按由内至外进行, 直至补偿完毕, 补偿完每一根钢绞线后锁定。

⑦用大千斤顶整体张拉至该级次的荷载, 按试验检验规定进行加压观测、记录。重复工作直至加荷至该循环的最大检验荷载。

⑧按表1的检验循环一级一级加荷、卸荷、观测、记录。

⑨每一循环拉拔完后须卸掉补偿的力, 再按

以上②~⑦的工作进行下一循环的加荷检验，如此进行直至拉拔结束。

3、拉拔试验张拉成果统计与分析

试验锚索张拉结果见表 2

根据 4 束试验锚索抗拉拔的情况，本次试验对 3 束 7m 锚固段和 1 束 12m 锚固段的不同锚固段长度的锚索进行拉拔其抗拔力均达到了 2080KN 以上的力。由此得出试验锚固段的安全系数为：

$$K_0 \geq 0.95 \times R_u / N_t = 0.95 \times 2080 / 1500 = 1.32$$

式中： R_u — 锚索极限承载力；

N_t — 单根锚索设计轴向拉力。

由于本次试验只按规范进行拉拔，未进行破坏性试验，因此实际锚固段的安全系数应大于 1.32。

4、试验结论

(1) 本次试验达到了预期的目的，检验了 1#、2#、3#、4# 试验锚索的锚固段结构，知道了试验安全系数 ≥ 1.32 。

(2) 由于岩土体的实际情况比较复杂，且本次试验未得出 7m、12m 锚固段的实际安全系数，根据我国《水工预应力锚固设计规范》(SL212-98) 中关于锚索锚固段安全系数的规定，锚固段的安全系数应在 1.5 以上。因此我部实际采取的进水口 1500KN 级锚索锚固段为 9m，此时锚索锚固段的安全系数为 $1.32 \times 9/7 = 1.70$ ，满足规范要求。

(3) 工程锚索的锚固段结构确定为：2.7m + 2.7m + 1.8m + 1.8m = 9m。其结构示意图如图 2、图 3。

(4) 试验证实了锚墩结构的缩小既方便了施工

表 2

锚索编号	锚索锚固段长(m)	施工锚孔孔径(mm)	拉拔机具	配套标定曲线方程(KN)	最大试验荷载(KN)	对应油压(Mpa)	设计力值(KN)	实际安全系数
1#	7	155	YCW250B	$T=47.195P-36.0$	2080	44.8	1500	1.32 以上
2#	7	156	YCW250B	$T=47.195P-36.0$	2080	44.8	1500	1.32 以上
3#	12	157	YCW250B	$T=47.195P-36.0$	2080	44.8	1500	1.32 以上
4#	7	154	YCW250B	$T=47.195P-36.0$	2080	44.8	1500	1.32 以上

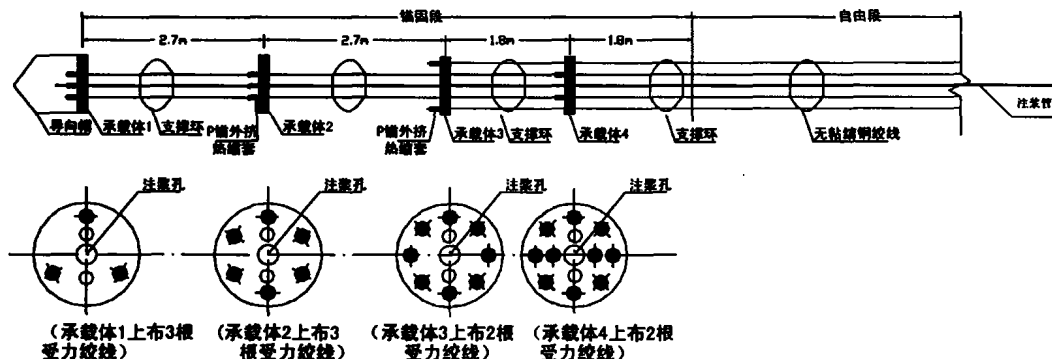


图 2 进水口压力分散型预应力锚索结构

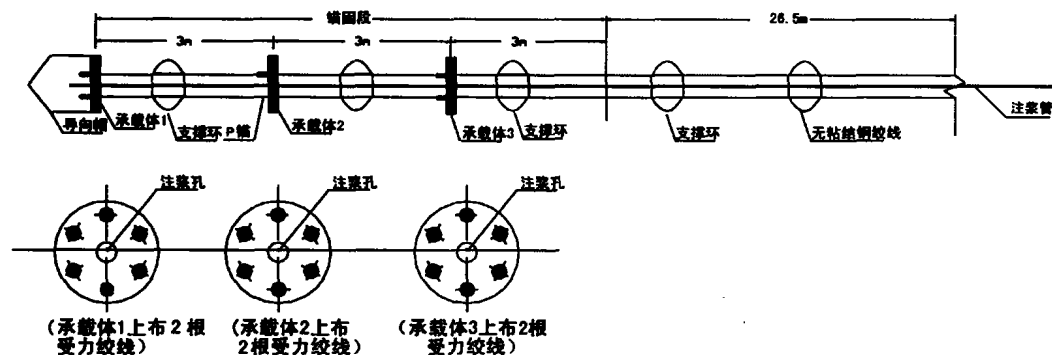


图 3 尾水洞压力分散型预应力锚索结构

又能满足工程需要。

五、整体施工方案

整体施工方案框图见图4。

六、施工工艺流程

(一) 施工工艺流程

测量、放样、定孔位、搭设工作平台→造孔→锚索制作→清孔、验孔→安装锚索→注浆→锚孔二次补浆→安装外锚头→预应力锚索一次张拉→二次补偿张拉→封锚

(二) 主要施工工艺特点介绍

1、关于进水口197.5m以下25m高×100m长的垂直壁上两排预应力锚索的施工平台问题。由于此边坡底部正进行进水塔塔基大面积浇注和2#、4#洞的开挖，为保证总工期和不影响边坡底部的施工，垂直壁上两排19束预应力锚索的施工将不可能采取常规的从底部搭设钢管架进行作业。我们提出了采用反吊平台进行悬吊式施工的可行、

高效的方法。反吊平台横向的一个吊点如图5所示。

在实施反吊平台之前，我们对此方案进行了反复论证并对吊点平台各构件进行了详细抗拉、抗剪、抗弯、抗扭等强度的计算校验，并对吊点用反力锚杆进行了计算和对每根锚杆进行了拉拔力超过6吨的检验，单个吊点的承受力就超过工作荷载的总力，保证绝对安全(限于篇幅计算过程略)。通过最终的施工检验，此悬吊式施工方法十分安全、高效，保证了边坡治理施工和塔基施工两项关键路线节点工程的顺利、提前完工。

2、由于边坡体整体十分破碎，卡钻、塌孔、跑风很严重，使得造孔工作十分困难。我们采用配中压高风量MD60钻进行造孔，在工程施工中通过多次分段固结灌浆、减小每次钻尺进度、使用专用取块状岩石器等手段最终处理好了象209.5m平台D4孔；197.5m平台C2、C3、C4孔；197.5m平台以下边坡B3、B15、B16孔等十分难钻进的锚孔，钻孔效率较高。

3、关于向上造孔及60.5m超长锚索安装困难的解决办法。针对施工中长锚索柔软、磨阻大的情况，我们通过缩小锚索外径、增大锚索刚度、改变

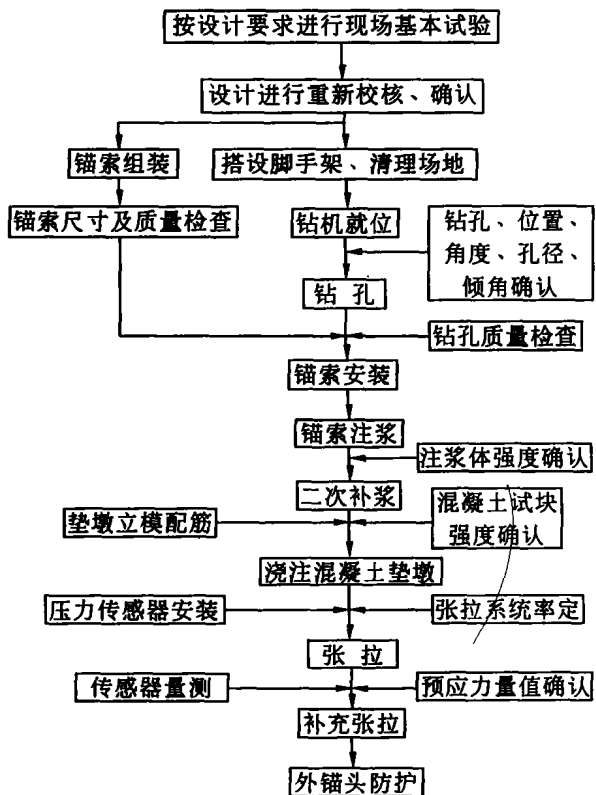


图4 整体施工方案框图

备注：以上工作进行的同时按设计要求进行锚索监测的施工。

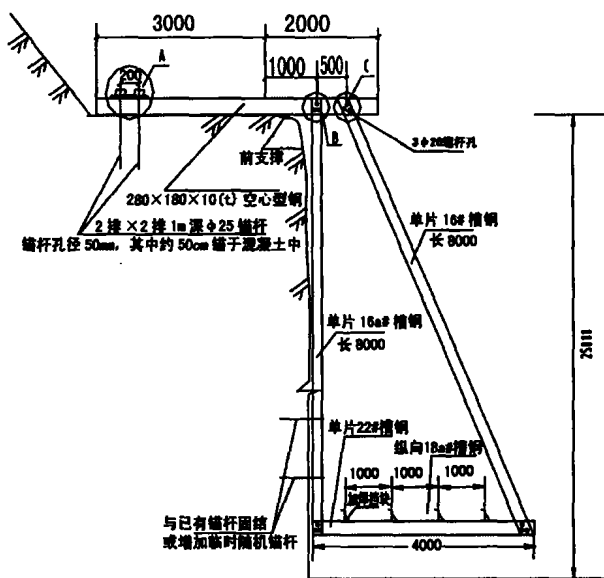


图5 进水口197.5m以下锚索施工用反吊平台

下索送力方式等手段克服了超长锚索向上送索难的问题。

4、关于向上锚孔注浆难以达到密实的解决办法。本工程根据具体情况，设计采用了工程应用中较少使用的向上 5 度的锚孔布置，使得保证锚孔注浆的密实性成为注浆的较大难题。施工中我们技术人员通过安装两根注浆管，两根排气管，且分别在孔口、孔底分不同时段进行一次、二次高压注浆，孔口采用止浆袋封孔的施工方法实现了孔道浆体的密实。通过最终的张拉检验，所有锚索的锚固力均达到设计要求，证明了灌浆手段和方法是成功的。

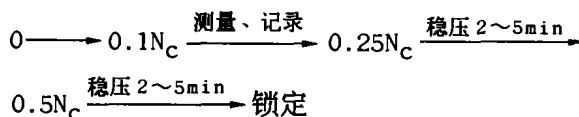
5、关于分段式压力分散型锚索预应力张拉方式。

压力分散型锚索由于不同承载体上的受力钢绞线不等长，预应力施作时一般分两种方式进行。一种是采用群拉群锚方式；一种是采用单拉单锚方式。这里所讲的群拉群锚实际就是在结合伸长

量补偿的情况下进行整束锚索的整体拉拔；而单拉单锚则是采用小千斤顶对称张拉方式或大千斤顶单拉每一承载体钢绞线的方式进行力的施加，也就是将压力分散型锚索按从内向外的顺序分别将不同的承载体上的钢绞线按一定分级程序张拉到位。百色水利枢纽岩土锚固工程即是采用单拉单锚的方式。

根据压力分散型锚索其不同承载体上钢绞线长度不等的结构特点，锚索预应力施加应对每一根锚索的承载体按由内向外的顺序对同一承载体上的钢绞线采用多台单根张拉小千斤顶(YDC240Q)对称张拉。同一承载体上的钢绞线其张拉程序为：

a. 第一次



将各承载体上的钢绞线按由内向外的顺序依次按以上程序对称进行张拉。

b. 第二次

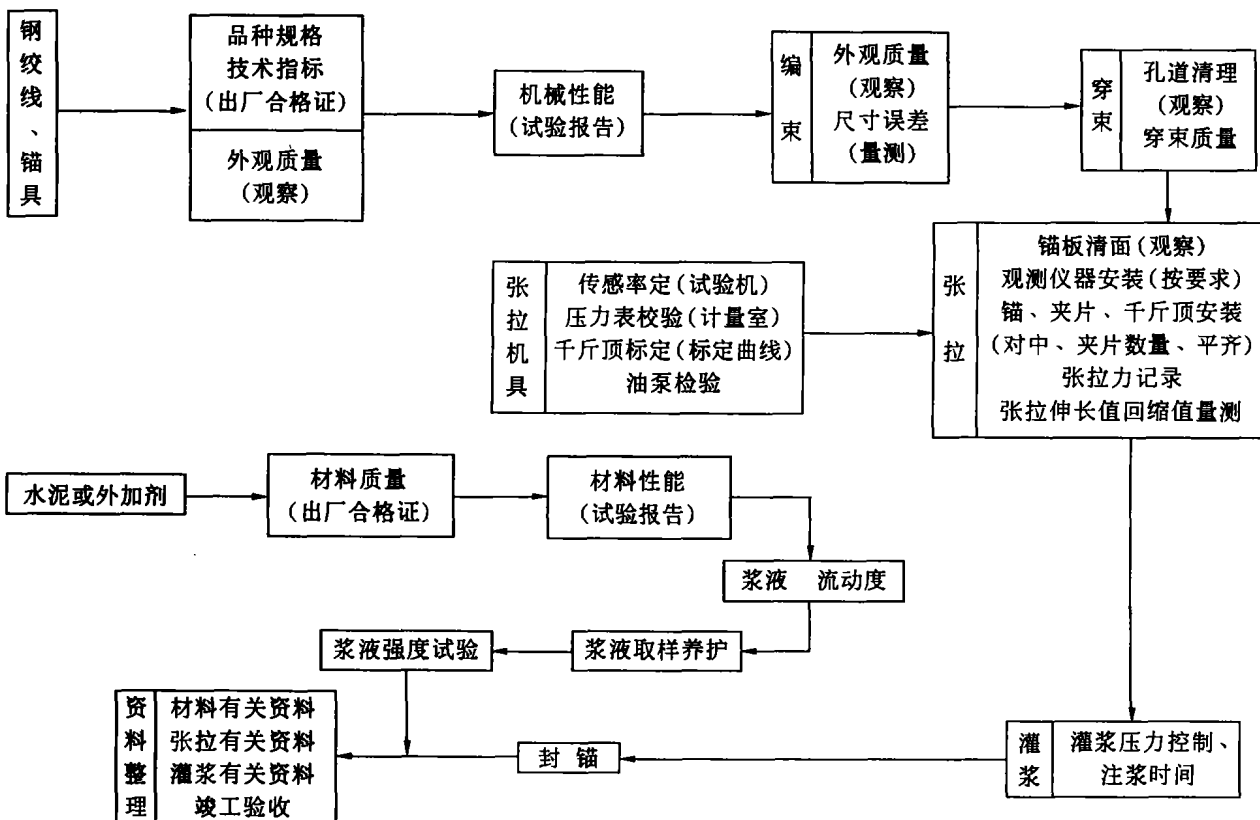
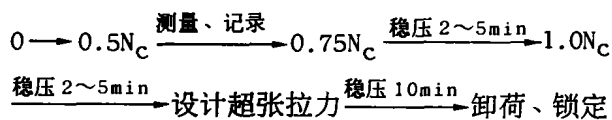


图 6 全面质量管理与质量控制流程图



将各承载体上的钢绞线按由内向外的顺序依次按以上程序对称进行张拉到位。

七、施工质量控制

全面质量管理与质量控制流程图见图 6。

八、结束语

本工程已于 2003 年 5 月顺利提前完工，在此工程施工中我们认为有以下可供其他类似工程施工参考借鉴的地方：

- 1、在软弱、破碎岩土体和较高防腐要求的工程中，锚索设计宜优先采用压力分散型结构。
- 2、对上仰锚孔下索难的情况，可对锚索结构进行适当调整，改变索体刚度和索径，同时改变送力方式等手段加以解决。
- 3、在垂直高边坡从下往上搭设钢脚手管工程量大或下部的施工不允许搭设排架的情况下可采

用悬吊式施工法。此法安全可靠、高效。

总之，本工程具有一定的典型性。随着预应力锚索技术的不断应用与发展，我国的岩土锚固技术将有更加广阔的发展空间。压力型锚固工法，特别是压力分散型锚固工法，由于其受力机理的合理性、能更有效发挥岩土体的抗剪强度以及优越的防腐性能，必将得到更快的发展，在我国的岩土锚固工程中发挥更大作用。

参考文献

- 1、程良奎。“岩土锚固新技术”。人民交通出版社，1998
- 2、程良奎 范景伦等。“岩土锚固”。中国建筑工业出版社，2003
- 3、李海民 李鑫等。“大吨位压力分散型锚索的设计与应用研究”、“岩石力学与工程学报”论文，2002 增刊

● 信息窗 ●

潘健生院士等专家到 OVM 公司授课

受柳州市政府和 OVM 公司的邀请，部分市政府顾问专家相继到我公司考察访问，并通过举办讲座的形式，给公司的技术骨干上了几节生动的专业课。10月27日，中国工程院院士、上海交大教授、博士生导师潘健生作了《热处理项目讲座》的报告。10月29日，博士生导师、享受国务院特殊津贴的北京机械工业学院徐小力教授作了生动的学术报告。

(龙摩乾)



(图为报告会现场)

(上接第 18 页)

到积极的作用。

会议代表们对柳州欧维姆机械有限责任公司的技术和生产经营情况有了较为全面的了解，对

OVM 公司的拉压分散新型锚索产品表现出了浓厚的兴趣，同时，OVM 公司也将加快 OVM 新型锚索在水电领域的推广应用。

(编辑部)