

龙滩水电站工程高边坡处理中 预应力锚索设计

董金玉 赵红敏 李文洪

(中南勘测设计研究院 湖南长沙 410014)

摘要:龙滩水电站边坡地质条件复杂,进水口边坡最大坡高达435m,为保证左右岸高边坡的整体稳定和工程的长期运行安全,龙滩工程左、右岸边坡加固支护中使用了1000kN、2000kN和3000kN级预应力锚索,来提高边坡的整体稳定性。本文主要介绍了预应力锚索的设计、构造及张拉程序等。

关键词:龙滩水电站 预应力锚索 设计 构造 张拉控制

1 概述

龙滩水电站位于红水河上游,广西天峨县境内,距天峨县城15km。电站装机容量6300MW,多年平均发电量187.1亿kW·h,保证出力168万kW,是我国“西电东送”电力开发战略中的标志性工程,是红水河梯级开发的龙头电站。

龙滩水电站工程因枢纽建筑物布置需要,坝基和进水口开挖在左、右岸形成了多处人工高边坡,其中,左岸倾倒蠕变体体积达1288万m³,铅直发育深度30~76m,自然坡高500余米,进水口的布置触及蠕变岩体,进水口开挖后最大坡高435m,为典型的反倾向层状结构岩质边坡,蠕变岩体边坡和进水口高边坡的治理是龙滩工程建设中遇到的关键技术问题之一,倍受关注。边坡岩体主要由砂岩、泥板岩互层构成,岩体软硬相间,层间错动发育,层状岩体的完整性较差。经多种方法分析研究,为保证高边坡的稳定和施工安全,主要采用预应力锚索对边坡进行了加固。预应力锚索按不同部位根据不同地质状况分别使用1000kN、2000kN和3000kN级,选用了性能优良的OVM锚具,成功治理了体积达1288万m³、坡高500余m的倾倒蠕变岩体边坡;开挖坡高达435m、坡面27万余m²的反倾向层状结构岩质高边坡;坡高达155~340m、坡面100万余m²的层状斜交边坡和体积达70万m³的多结构面切割构成的不稳定楔体。

注:《龙滩水电站高边坡工程预应力锚索设计》项目获第二届欧维姆预应力技术奖三等奖。

预应力锚索施工从2001年10月开始,2003年9月基本完成,总计锚索用量3000多束、2635万t·m。采用预应力锚索加固龙滩水电站高边坡,确保了边坡稳定和施工安全,为实现2003年11月河床截流、2006年9月30日提前下闸蓄水、2007年5月第一台机组提前发电创造了有利条件。

本文主要介绍预应力锚索的设计、构造等。

2 锚索设计

2.1 钢绞线根数的确定

2.1.1 钢绞线材料

预应力钢绞线选用符合美国标准ASTM A416-87a的钢绞线,采用270K级,每股钢绞线由7 ϕ 5mm的高强度低松弛钢丝组成,其材料强度标准值1860N/mm²,公称直径 ϕ 15.24mm,公称截面积140mm²,单股钢绞线破断荷载260.7kN,延伸率 \geq 3.5%。

2.1.2 确定材料强度利用系数

采用预应力锚索对岩体实施锚固,需考虑岩体的地质条件,及岩质高边坡变形特点及其发展趋势等因素,来确定锚索材料的强度利用系数。一般要求锚索中的平均应力,不宜大于材料极限抗拉强度的60%。同时,在预应力锚索锁定后,由于锚夹片的回缩及锚索张拉过程中锚索体与孔壁的摩擦,以及岩体中软弱夹层等引起的锚索回缩,都会对锚索产生一定的预应力损失,所以为保证设计需要的锚固力,超张拉荷载一般按不超过设计张拉力的15%控制。考虑到龙滩工程高边坡具体地质条件以及边坡位置的重要性,钢绞线

设计强度采用材料强度标准值的55%，即单股钢绞线的设计强度为140.61kN；超张拉时钢绞线设计强度取材料强度标准值的65%。

龙滩水电站边坡支护中锚索设计吨级有三种，即1000kN级、2000kN级和3000kN级，按照上述确定的材料强度利用系数，设计单根1000kN级锚索选用7股，材料强度标准值利用系数实际为55.88%；设计单根2000kN级锚索选用14股，材料强度标准值利用系数实际为55.88%；设计单根3000kN级锚索选用22股，材料强度标准值利用系数实际为53.34%。

2.2 锚索结构型式选择

目前在加固工程中使用的锚索类型种类繁多，按不同的分类方法可将锚索划分为不同的类型，按内锚固段结构受力状态分为拉力型、压力型和压力分散型等锚索；按锚杆的张拉段同被锚固介质之间有无相对滑动分为有粘结预应力锚索和无粘结预应力锚索；按施工条件的不同分为一端张拉端锚型锚索和两边张拉对穿型预应力锚索等等。

根据龙滩工程高边坡层状岩体变形和稳定特点，锚索内锚固段的结构型式均按拉力型设计，各吨级锚索型式如下：1000kN级，分为粘结式端锚型锚索和无粘结式端锚型锚索；2000kN级，分为粘结式端锚型锚索、粘结式对穿型锚索、无粘结式和无粘结式端锚型锚索以及无粘结式对穿型锚索；3000kN级，分为粘结式对穿型锚索和无粘结式对穿型锚索。其中，无粘结式锚索作为监测锚索使用。

2.3 内锚头设计

内锚头的设计，对于端锚型粘结式预应力锚索来说，主要是确定锚固段的长度 L ；对于端锚型无粘结式预应力锚索来说，主要是确定锚索内端剥离塑料包裹和除去油脂后裸露的钢绞线长度。锚固段的长度，主要受两个因素的控制：一是锚固段的胶结材料（注浆体）同孔壁的粘结力；另一个是胶结材料同钢绞线的握裹力。胶结式锚固段所提供的锚固力，必须大于预应力锚索超张拉力。

2.3.1 不使注浆体沿孔壁滑移

假定注浆体同孔壁的剪应力沿孔壁均匀分布，内锚固段长度 L 的计算公式如下：

$$L = k \frac{q_m}{\pi DC}$$

式中：

L —锚固段长度（m）；

q_m —单根锚索超张拉力（N）。按锚索设计张拉力的110%考虑，1000kN、2000kN级锚索的超张拉力分别为：1100kN和2200kN；

D —锚索孔直径（m）。1000kN、2000kN级锚索孔的直径分别为125mm和160mm；

C —胶结材料同孔壁的粘结强度（Pa）；

k —锚固段长度的安全系数。按永久性锚固工程的俯孔取值，即 $k=1.5$ 。

按胶结材料（注浆体）与孔壁间的粘结力为 $C=0.6、0.8、0.9、1.0\text{MPa}$ ，进行敏感性分析后，据此计算出的锚固段长度，根据龙滩工程边坡地质资料，1000kN级锚索，采用锚固段长度 $L=5\text{m}$ ；2000kN级锚索，采用锚固段长度 $L=8\text{m}$ 。

2.3.2 保证钢绞线与注浆体不脱开

目前，国内外对锚索体与注浆体之间剪应力的分布和传递机理的研究尚不成熟，对于这一问题仍需进行大量的试验研究工作。在设计中，按锚索与注浆体之间的握裹长度不超过10m的情况考虑，假定剪应力是沿锚固段均匀分布的，得出锚固段长度的计算公式如下：

$$L = k \frac{q_m}{n \pi d \tau_u}$$

式中： n —钢绞线根数；

d —钢绞线直径（mm）；

τ_u —极限剪应力

极限剪应力的大小与锚索体材料表面粗糙度和注浆体强度有关，注浆体抗压强度不小于30MPa时，钢绞线与注浆体之间的极限剪应力 $\tau_u \leq 2.0\text{MPa}$ ，取 $\tau_u=1.5\text{MPa}$ 。由此计算出的锚固段长度，对于1000kN级锚索和2000kN级锚索，锚固段长度均为 $L_2=3.28\text{m}$ 。

对于无粘结式锚索，尚应保证波纹管与其内外注浆体间不剪开。

锚索内锚固段的长度必须满足大于或等于以上计算结果中的最大值，最终取内锚固段长度值确定如下：1000kN级锚索， $L=5\text{m}$ ；2000kN级锚索， $L=8\text{m}$ ；3000kN级锚索只有对穿型，不计算内锚固段长度。

2.4 外锚头设计

外锚头的作用是把锚具的集中荷载均匀地传递到岩体上，属于纯受压构件。

根据龙滩工程边坡地质资料，边坡岩体允许抗压强度为7~25MPa，锚墩混凝土等级为C40。

对于岩石边坡，外锚头由钢筋混凝土垫墩、钢垫板、工作锚板等部件组成。墩体为上小下大的梯形断面，底面积的大小主要决定于锚索的设计承载力和锚墩下部岩体的容许承压力。锚墩顶部设钢垫板，其中心正交焊接一壁厚5mm的Q235钢套管，以保证锚墩表面与锚索轴线垂直。锚墩内设置一层直径 $\phi 14\text{mm}$ 的钢筋网，并在孔口钢管周围设置螺旋筋，螺旋筋直径，对于1000kN级锚索为 $\phi 14\text{mm}$ ，对于2000kN、3000kN级锚索为 $\phi 20\text{mm}$ 。不同吨级锚索外锚墩尺寸见表1。

表1 外锚墩尺寸表

序号	锚索吨级	锚墩 (mm)			钢垫板 (mm) 长×宽×厚
		顶部 (长×宽)	垫墩高	底部 (长×宽)	
1	1000kN	400×400	500	900×900	250×250×30
2	2000kN	500×500	600	1100×1100	350×350×50
3	3000kN	500×500	600	1100×1100	350×350×50

对于全风化及强风化岩体边坡，为避免局部应力集中和变形过大，外锚头在上述钢筋混凝土垫墩基础上增加网格状布置的钢筋混凝土外锚梁，外锚梁以2根或3根锚索为一组。增加外锚梁的锚索有1000kN级和2000kN级两种，其结构示意图见图1。1000kN级锚索外锚梁尺寸为600mm×450mm（宽×高）混凝土板厚250mm；2000kN级锚索外锚梁尺寸为700mm×600mm

（宽×高），混凝土板厚300mm。外锚梁内布设6 ϕ 25mm钢筋，钢筋混凝土板内设 $\phi 16\text{mm}$ 钢筋。

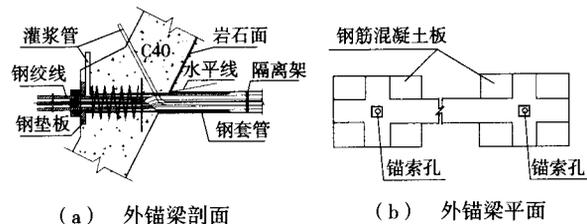


图1 外锚梁结构示意图

2.5 锚索构造设计

选取2000kN级锚索介绍其构造设计，其他吨级与此相类。2000kN粘结式及无粘结式端锚型预应力锚索的构造见图2。

组成粘结式端锚型预应力锚索的主要部件如下：（1）无皮钢绞线，每股钢绞线由7 ϕ 5mm高强度低松弛钢丝组成；（2）内隔离架，在内锚固段，隔离架间距1m，在自由张拉段，隔离架间距2m；（3）导向帽；（4）定位止浆环；（5）内、外部灌浆管；（6）止浆环充气管；（7）钢套管；（8）钢筋混凝土锚墩；（9）钢垫板；（10）锚具。

对于粘结式对穿型预应力锚索，没有内锚固段，则相应去掉上述端锚型预应力锚索的导向帽、定位止浆环及充气管，钢筋混凝土锚墩、钢套管及锚具等增加一套，内隔离架每2m一个。

组成无粘结式端锚型预应力锚索的主要部件如下：（1）带皮钢绞线，每股钢绞线由7 ϕ 5mm高强度低松弛钢丝组成，内锚固段部分钢绞线剥去外皮并除掉油脂；（2）内隔离架，在内锚固段，隔离架间距1m，在自由张拉段，隔离架间距2m；（3）外对中支架，间距及数量与内隔离架对应相同；（4）波纹管；（5）灌浆管；（6）钢套管；（7）钢筋混凝土锚墩；（9）钢垫板；（10）锚具。

对于无粘结式对穿型预应力锚索，没有内锚固段，钢绞线不必除去外皮，钢筋混凝土锚墩及锚具增加一套，内隔离架每2m一个。

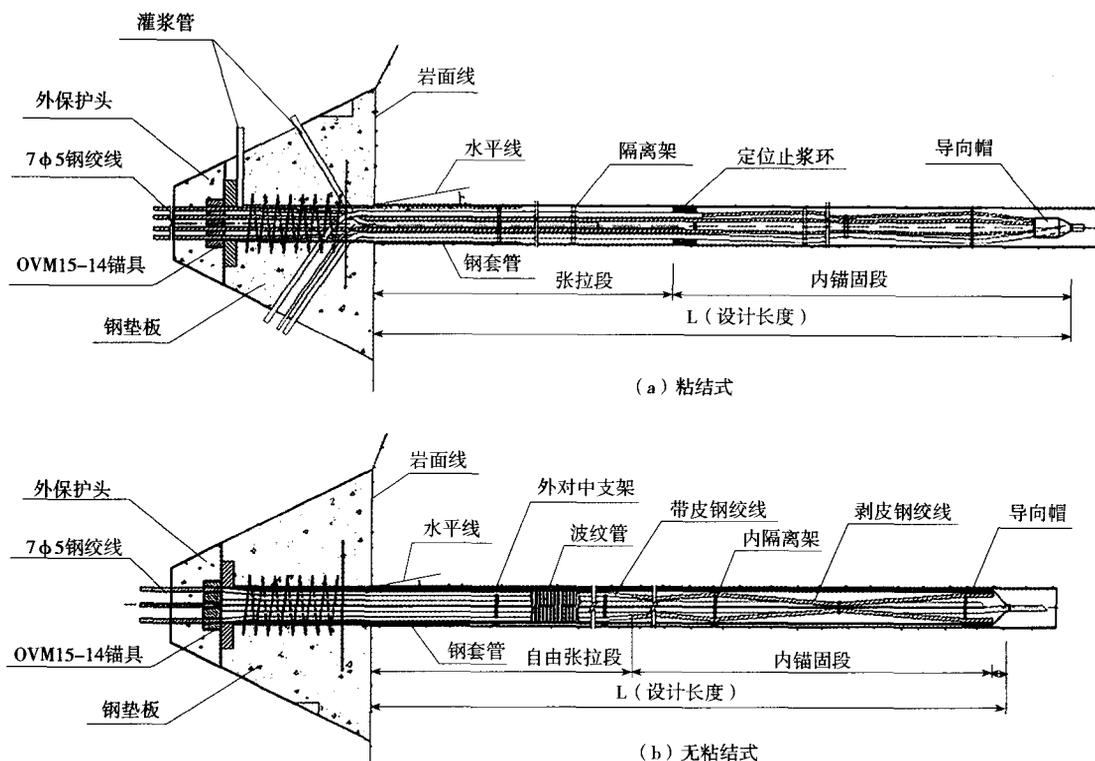


图2 2000kN端锚型锚索结构图

2.6 锚索张拉控制

预应力采用一次性超张拉方法施加。

当锚固段注浆体强度达到35MPa后才能对锚索进行张拉，锚索张拉是锚索施工中的一个非常重要的环节，采用先单根预紧然后整体张拉的方法。锚索正式张拉前，先对每根钢绞线施加50kN的张拉荷载进行预紧，以使锚索各钢绞线受力均匀，完全平直，并将荷载锁定在锚板上，再将所有锚索一起分级按锚索设计应力的30%、60%、100%、110%分级张拉至超张拉荷载，超张拉荷载按锚索设计应力的10%考虑。各吨级锚索张拉时张拉力按以下分级进行：

1000kN级锚索：预紧—300kN—600kN—1000kN—1100kN（超张拉）

2000kN级锚索：预紧—600kN—1200kN—2000kN—2200kN（超张拉）

3000kN级锚索：预紧—900kN—1800kN—3000kN—3300kN（超张拉）

张拉过程中当达到每一级的控制张拉力后，持荷稳压5分钟才能进行下一级张拉，达到最后一级张拉力后持荷稳压30分钟，然后锁定。

张拉时，升荷速率每分钟不宜超过设计张拉力的1/10，卸荷速率每分钟不超过设计应力的1/5。

锚索锁定后，当预应力损失超过设计张拉力的10%时，应进行补偿张拉。补偿张拉在锁定值基础上一次张拉至超张拉荷载。

当锚索实际伸长值大于理论计算值10%或小于5%时，应暂停张拉，查明原因并采取相应措施予以调整后，方可继续张拉。

3 几点体会及认识

3.1 隔离架

最初设计时，锚索内部隔离架采用5mm厚Q235钢板，施工过程中发现，在隔离架孔洞周边没有很好地修整平滑时，在穿索过程中隔离架与钢绞线接触部位边角毛刺很容易损伤钢绞线，为此，现场施工中改用25mm厚的硬塑质隔离架，减小了锚索穿索时对孔壁的摩擦力，提高了工作效率。情况改观不少。但使用25mm厚塑质隔离架时，由于塑质隔离架与注浆体的粘结程度没有钢板与注浆体的粘结程度好，相当于在锚索注浆体中增加了一些薄弱环节，是否对锚索体的受力情况有影响还有待于进一步研究。（下转第24页）

4.2 观测结果分析

观测显示加荷后支架总体稳定性较好,贝雷梁挠度及钢管柱沉降量在预期范围内,但钢管柱存在一定的纵向及侧向位移。

4.3 加强措施

为增强钢管柱整体稳定性,决定在中支墩支撑钢管柱间设 2×2 根水平钢管,采用 $\phi 273\text{mm}$ 螺旋钢管焊接,将支架立柱连成整体;在每跨支撑钢管外加打一根抗侧向位移钢管并与支撑钢管连成整体。

5 小结

2007年8月7日成功进行了左幅第六联箱梁混凝土浇筑,混凝土施工过程中进行了支架变形和稳定性监测,施工过程中支架稳定性良好,沉降、位移数据均在控制范围内,实践证明支架设

计施工方案合理可行,水上现浇箱梁支架采用钢管贝雷结构有较好的安全可靠。

支架搭设前需要进行力学验算,在浇筑前要进行预压,通过观测判定支架稳定性。

支架施工应严格遵守设计施工方案,保证钢管桩的贯入度和入土深度,做好横梁、贝雷梁安装的细部处理和钢管桩之间的连接加固。

参考文献

- [1] 周水兴,等. 路桥施工计算手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2003
- [2] GB50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003
- [3] GB50007-2002, 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002
- [4] JTJ041-2000, 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2000
- [5] GB5007-2002, 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002

(上接第12页)

3.2 止浆环

原设计止浆环为穿孔Q235钢板上焊接一10cm长钢管,钢管外套气囊,并在气囊外用3mm厚橡胶保护,钢管内钢绞线间以环氧充填。施工时,在穿索到位后向气囊充气,压迫外裹橡胶紧贴孔壁,以达到止浆的目的。实际施工中发现,由于钻孔孔壁不平滑,遇到尖利岩石棱角时,容易划破气囊,造成漏浆,使锚固段过长。后止浆环改用高弹尼龙止浆袋,注浆时先向止浆袋中注浆,注浆满时浆液自动流向锚固段,在止浆环处形成混凝土塞,紧贴岩壁,达到止浆目的。实践证明,这种方法简便易行,节省材料,同时由于减少了向气囊充气这个环节,对加快工程进度也有一定的作用。

3.3 外锚头

在边坡岩体较破碎或全、强风化岩体边坡,采用纵横向布置的钢筋混凝土外锚梁,将单个锚墩的张力分散,不仅避免了局部应力集中,减小了因预应力施加而使岩体产生过大的变形,而且对整个边坡的稳定有利。

3.4 锚索方向

龙滩左岸进水口边坡为反向层状结构岩体,锚索孔的最佳孔向是垂直岩体层面,将不稳岩体

通过预应力锚索与深部稳定岩体连接为一个整体,以提高边坡整体稳定性。为此最佳孔向应为仰孔,但当锚索孔孔向为仰孔时,不能保证注浆的密实度,从而影响到锚固力的正常发挥,故锚索孔造孔方向选为俯斜孔,与水平面成 $10 \sim 15$ 度俯角,锚索穿过岩石层面与深部稳定岩体连接为一个整体。

3.5 钻孔

锚索钻孔过程中,在含有大量裂隙或破碎的岩体中,为保证钻孔顺利进行和锚固段具有足够的承载力,并避免锚固段注浆时浆液流失,应进行固结固壁灌浆。

3.6 锁定吨位

考虑到锚具夹片的回缩及锚索与孔壁的摩擦等都会对锚索的预应力产生一定的损失,为了保证锚索的设计锚固力,在选择锚索锁定吨位时按锚索设计锚固力的10%考虑。

4 结语

根据现场监测结果,龙滩工程边坡预应力锚索满足规范和设计要求。锚索施加于边坡后,边坡位移明显减缓并趋于稳定,锚索工作状态良好。以预应力锚索作为主要加固措施,对改善边坡稳定性及加快工程进度起了较大的作用。