

# 两河口水电站压力分散型锚索差异张拉计算与分析

陈晓东, 钟久安, 臧鹏, 冯杨文

(四川共拓岩土科技股份有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 差异张拉法能够有效提高压力分散型预应力锚索的张拉作业工效, 此工艺在两河口水电站泄水建筑物进口边坡中成功应用。为保证张拉至 110% 设计荷载时钢绞线平衡受力, 对差异补偿荷载进行了计算与分析, 发现考虑预紧阶段已产生的差异量是受力平衡的关键, 并对单根差异补偿和整体张拉阶段进行了简要的介绍和分析。

**关键词:** 压力分散型锚索; 差异张拉; 差异补偿荷载; 水电站边坡

**中图分类号:** P642.22; TV546 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2020)05-0085-04

## Calculation and analysis of differential tension of pressure dispersion anchor cables at Lianghekou Hydropower Station

CHEN Xiaodong, ZHONG Jiuan, ZANG Peng, FENG Yangwen

(Sichuan Gotone Geotechnical Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000, China)

**Abstract:** The differential tensioning method can effectively improve the tensioning efficiency of the pre-stressed anchor cable with pressure dispersion, which has been successfully applied in the slope reinforcement for the drain building of Lianghekou Hydropower Station. In order to ensure the balanced load of the steel strand when tension reaches 110% of the design load, the differential compensation load is calculated and analyzed, and it is found that the difference generated in the pre-tightening stage is key to balanced load. The single differential compensation and the overall tension stage are briefly introduced and analyzed.

**Key words:** pressure dispersion anchor cable; differential tensioning; differential compensation load; slope of hydropower station

### 1 工程概况

雅砻江两河口水电站位于四川省甘孜州雅江县境内的雅砻江干流上, 在雅江县城上游约 25 km, 为雅砻江中下游梯级电站的控制性水库电站工程, 对整个雅砻江梯级电站的开发影响巨大。电站的开发目的主要为发电, 同时具有蓄水蓄能、分担长江中下游防洪任务、改善长江航道枯水期航运条件的功能和作用, 其经济效益十分显著。电站坝址位于雅砻江干流庆大河河口以下约 1.8 km 河段上, 控制流域面积 65599 km<sup>2</sup>。两河口水电站是中国藏区规模最大的水电站工程, 拥有 295 m 国内最高土石坝。

两河口水电站泄水建筑物进口边坡开挖高度 606 m, 布置压力分散型预应力锚索约 4400 束, 以 1500 和 2000 kN 为主。锚索钢绞线采用  $\varnothing 15.20$

mm、1860 MPa 无粘结预应力钢绞线。

### 2 张拉方法选择

压力分散型预应力锚索(图 1)适用范围广, 利用各级承载体将应力均匀分布于锚固段不同深度, 有效避免了应力集中, 对锚固段地质条件的要求相对低<sup>[1]</sup>。因各组钢绞线张拉长度不一致, 采用整体张拉的方法会导致一部分钢绞线达不到设计张拉力, 而另外一部分钢绞线超过设计张拉力, 甚至超过钢绞线允许应力。所以目前压力分散型预应力锚索常用的张拉方法是单根分级循环张拉法。但是单根分级循环张拉作业效率低, 以 2000 kN 锚索(13 根钢绞线)为例, 严格按照现行施工规范施工, 控制升压、泄压速度, 各级持荷 2~5 min, 锁定持荷 10 min, 单根锚索的张拉综合工效约为 9.1 h/根。单

收稿日期: 2019-02-28; 修回日期: 2020-03-03 DOI: 10.12143/j.tkgc.2020.05.014

作者简介: 陈晓东, 男, 汉族, 1985 年生, 项目主管, 工程师, 勘查技术与工程专业(岩土钻掘方向), 长期从事岩土工程基础处理相关技术和管理  
工作, 四川省成都市青羊区, 476839114@qq.com。

引用格式: 陈晓东, 钟久安, 臧鹏, 等. 两河口水电站压力分散型锚索差异张拉计算与分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(5): 85-88.  
CHEN Xiaodong, ZHONG Jiuan, ZANG Peng, et al. Calculation and analysis of differential tension of pressure dispersion anchor cables at Lianghekou Hydropower Station[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(5): 85-88.

根分级循环张拉对操作人员的技能熟练程度和责任心要求较高,过程中容易因“漏拉”造成质量问题。

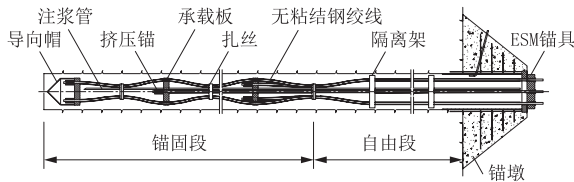


图1 压力分散型锚索结构示意图

Fig.1 Structure of the pressure dispersion anchor cable

差异张拉法能够有效提升作业效率,并从程序上避免一部分质量问题,其作业程序为:单根预紧→差异补偿张拉→整体张拉,采用此工艺后 2000 kN 锚索(13 根钢绞线)张拉综合工效约为 2.5 h/根,综合工效提升 264%,人力资源和设备资源占用率大幅度降低<sup>[1-7]</sup>。

整体张拉千斤顶“递进型”补偿张拉操作以组为单位,首先补偿最长一组钢绞线伸长值,补偿值为最长一组钢绞线与第二长一组钢绞线之间的最终伸长量差值  $\Delta L_{1-2}$ ,然后第一组与第二组同时补偿第二长一组钢绞线与第三长一组钢绞线之间的最终伸长量差值  $\Delta L_{2-3}$ ,依次类推。这种方法要求在张拉油泵和千斤顶工作状态下安装后续组的夹片,因差异补偿值较小,所以安装后续组夹片时对张拉压力的稳定性要求较高以保证张拉精度,同时在千斤顶受力状态下安装夹片存在安全隐患。

单根差异补偿首先计算出各组钢绞线在最终受力状态下的伸长量  $\Delta L$ ,然后以最短一组钢绞线伸长量为基准,计算较长钢绞线相对于最短钢绞线的伸长值差值  $\Delta L_1$ ,再计算出预紧阶段较长钢绞线相对于最短钢绞线伸长值的差值  $\Delta L_2$ ,最终计算出每根钢绞线的差异补偿伸长值  $\Delta L_3 = \Delta L_1 - \Delta L_2$ ,用

$\Delta L_3$  分别计算出每根钢绞线的差异补偿张拉油压力<sup>[8]</sup>。在预紧后进行单根补偿张拉,没有千斤顶受力状态下安装夹片的环节,施工进度和施工安全得到较好保障。

综合施工效益、工艺简洁性、质量控制和施工安全等方面的因素,压力分散型预应力锚索张拉作业可优先选用差异张拉法,且差异补偿应采用单根差异补偿的方式,程序为:单根预紧→单根差异补偿张拉→整体张拉<sup>[9-11]</sup>。

### 3 差异张拉计算与分析

两河口水电站泄水建筑物进口边坡开挖高度 606 m,按照“少开挖强支护”的思路进行设计,布置 500、1000、1500 和 2000 kN 等压力分散型预应力锚索约 4400 束,以 1500 和 2000 kN 为主,锚索设计深度 20~80 m。锚索钢绞线采用  $\text{O}15.20$  mm、1860 MPa 无粘结预应力钢绞线。

保证张拉至 110%设计荷载时钢绞线平衡受力,对差异补偿荷载进行了计算与分析,为了方便计算工作夹片回缩量暂不考虑。计算设计参照《水电水利工程预应力锚索施工规范》(DL/T 5083-2010)。

#### 3.1 单根差异补偿计算

首先进行单根预紧张拉,然后根据差异补偿值进行单根补偿,经单根差异补偿后各组钢绞线受力不同,所以后续整体张拉是一个受力渐趋平衡的阶段。每组张拉阶段计算张拉长度值  $L$  取所有钢绞线的平均张拉长度,钢绞线截面积  $A$  为所有钢绞线截面积之和。

以  $P=2000$  kN、 $L=50$  m 压力分散型预应力锚索(13 根钢绞线)为例计算其各阶段各组伸长值,并使用累计伸长值反算钢绞线最终受力,见表 1。

表 1  $P=2000$  kN、 $L=50$  m 压力分散型预应力锚索差异张拉计算

Table 1 Calculation of differential tensioning for pressure dispersion prestressed anchor cables with  $P=2000$  kN,  $L=50$  m

组别	张拉长度 $L$ /m	钢绞线最终 伸长值/mm	最终伸长量相 较差值/mm	预紧伸长 值/mm	预紧伸长量相 较差值/mm	差异补偿伸 长值/mm	整体张拉伸 长值/mm	累计伸长 值/mm	累计受 力/kN	110%设计 张拉力/kN
第一组	51.0	316.15	46.50	57.48	8.45	38.05		316.86	169.61	
第二组	49.5	306.85	37.20	55.79	6.73	30.43		307.55	169.62	
第三组	48.0	297.55	27.90	54.10	5.07	22.83		298.26	169.64	
第四组	46.5	288.25	18.60	52.41	3.38	15.22	221.33	288.96	169.65	169.23
第五组	45.0	278.95	9.30	50.72	1.69	7.61		279.66	169.66	
第六组	43.5	269.65	0.00	49.03	0.00	0.00		270.36	169.67	

注:(1)表中锚索入岩 50 m,锚墩与张拉所需长度合计 1 m;(2)锚索设置 6 组承载体,前 5 组均为 2 根钢绞线,最后一组 3 根钢绞线,承载体间距 1.5 m;(3)表中均为单根钢绞线数据;(4)按照超张拉 10%计算。

从表 1 可以发现,按照这种方法计算出来的累计伸长值和采用单根分级循环张拉计算出的伸长值偏差约 0.71 mm,进而导致反算出的受力偏差约 0.41 kN,这种偏差是多次运算并四舍五入造成的,偏差率约 0.26%。所以这种方法计算出的差异补偿值和整体张拉值是正确的,累计张拉力和累计伸长值与 110%设计值吻合。

### 3.2 两种差异补偿方法的对比

表 2 不考虑预紧阶段产生差异量计算分析

Table 2 Calculation and analysis not considering the differences from the pre-tightening stage

锚索长度 $L/m$	差异补偿值/ $m$	单根累计伸长值/ $mm$	单根累计应力/ $kN$	单根设计应力/ $kN$	单根受力偏差值/ $\%$
30	0~46.49	143.19~198.14	166.35~174.49	169.23	-1.70~3.11
40	0~46.49	204.84~259.78	166.93~172.98	169.23	-1.36~2.21
50	0~46.49	266.62~321.56	167.32~172.13	169.23	-1.13~1.71
60	0~46.49	328.46~383.41	167.61~171.59	169.23	-0.96~1.39

注:本表计算条件与表 1 一致。

表 3 考虑预紧阶段产生差异量计算分析

Table 3 Calculation and analysis considering differences from the pre-tightening stage

锚索长度 $L/m$	差异补偿值/ $m$	单根累计伸长值/ $mm$	单根累计应力/ $kN$	单根设计应力/ $kN$	单根受力偏差值/ $\%$
30	0~38.04	146.84~193.33	170.25~170.58	169.23	0.61~0.80
40	0~38.04	208.54~255.03	169.82~169.95	169.23	0.35~0.42
50	0~38.04	270.30~316.86	169.61~169.67	169.23	0.22~0.26
60	0~38.04	332.23~378.72	169.49~169.53	169.23	0.16~0.18

注:本表计算条件与表 1 一致。

段产生的差异量相比不考虑的情况单根钢绞线受力偏差量明显减小,减小率 71%~86%,钢绞线受力更加均衡。

在锚索现场施工过程中由于软基础、孔道偏斜、锚墩方位偏析、混凝土质量等客观情况,偏差值对锚索整体受力的影响会进一步放大。所以压力分散型预应力锚索差异张拉应用过程中应考虑预紧阶段产生的差异量,减小偏差,利于质量控制。

### 3.3 整体张拉阶段计算

压力分散型预应力锚索经过差异补偿张拉阶段后的应力趋近于甚至超过设计张拉力的 25%,所以整体张拉阶段应根据不同类型锚索的计算结果决定是否取消 25%一级,直接从 50%一级开始分级整体张拉。举例计算的结果见表 4。

## 4 实际运用及效果

两河口水电站泄水建筑物进口边坡开挖坡面高度 606 m,布置压力分散型预应力锚索 4400 余束,高峰期施工强度达到每天 12 束。开工之初先后进

在计算差异张拉补偿值的时候应考虑预紧阶段各组钢绞线已经产生的差异伸长量,否则会使得累计伸长值和累计张拉力与 110%设计值之间有较大偏差。以  $P=2000$  kN、 $L=30,40,50,60$  m 几种压力分散型预应力锚索为例进行计算,计算结果见表 2<sup>[12-15]</sup>。

将预紧阶段产生的差异量考虑进去,采用单根差异补偿的方法计算张拉完成后锚索受力,见表 3。

将表 2 和表 3 进行对比,可以看出考虑预紧阶

表 4 差异补偿张拉后锚索应力与设计值的比值

Table 4 Ratio of differential compensation tensioned anchor cable stress to design value

锚索长度 $L/m$	差异补偿后应力/ $kN$	设计张拉力/ $kN$	比值/ $\%$
30	602.39	2000	30.12
40	550.01	2000	27.50
50	519.20	2000	25.96
60	498.91	2000	24.95

注:本表计算条件与表 1 一致,为整束锚索受力数据。

行了锚索破坏性试验和工艺性试验,进行了充分的压力分散型预应力锚索差异张拉方法论证与测试,测试结果表明,考虑预紧阶段差异量的单根差异张拉能够满足设计应力要求、钢绞线平衡受力、施工效率高,并在主体工程推广运用。泄水建筑物进口边坡锚索全部采用差异张拉法施工,有效提高了施工效率,施工过程无质量事故发生,施工质量满足验收要求<sup>[16-18]</sup>。

## 5 结论

(1)差异张拉能够满足设计张拉应力要求,具有

操作简单、受力平衡、施工效率高等特点,压力分散型预应力锚索可以优先选用此张拉工艺。

(2)单根差异补偿张拉是保证施工质量、降低人员熟练程度要求、消除作业安全隐患的有效方式。

(3)计算差异补偿值时应考虑预紧阶段钢绞线已产生的差异量,是张拉至110%设计荷载时钢绞线受力平衡的关键。

(4)整体张拉可根据差异补偿后锚索应力情况选择从设计应力的50%开始分级整体张拉。

## 参考文献(References):

- [1] 陈礼仪, 胥建华. 岩土工程施工技术[M]. 成都: 四川大学出版社, 2008.  
CHEN Liyi, XU Jianhua. Geotechnical engineering construction technology[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2008.
- [2] 郑静, 朱本珍. 荷载分散型锚索差异补偿荷载的广义确定[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(1): 44-47.  
ZHENG Jing, ZHU Benzhen. The method of generally determining differential compensative load for scatteredload anchor rope[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(1): 44-47.
- [3] 王新建. 单束张拉和多束张拉工艺在斜坡治理中的联合应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(5): 71-76.  
WANG Xinjian. Combined application of single beam tensioning and multi-beam tensioning technology in slope treatment [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(5): 71-76.
- [4] 黄润秋, 等. 复杂岩体结构精细描述及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
HUANG Runqiu, et al. Fine description of complex rock mass structures and its engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [5] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 292-297.  
HUANG Runqiu. Main characteristics of high rock slopes in southwestern China and their dynamic evolution[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 292-297.
- [6] 祝怀田. 两河口水电站引水进口高边坡稳定性评价及支护方案研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.  
ZHU Huaitian. Stability estimation and support scheme study to the water inlet slope of Lianghekou Hydroelectric Power Station [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [7] 刘鸿. 压力分散型锚索锚固机理及相关技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.  
LIU Hong. Study on anchorage mechanism of dispersed pressure anchor cable and relevant technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [8] 黄辉, 王晋明. 压力分散型锚索差异张拉法在两河口水电站工程中的应用[J]. 水利水电技术, 2015, 46(4): 93-95, 99.  
HUANG Hui, WANG Jinming. Application of differentially tensioning method for pressure decentralized anchor-cable to construction of Lianghekou Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(4): 93-95, 99.
- [9] 周裕利, 芦黎. 压力型岩锚锚固体应变测试及分析[J]. 广州建

筑, 2012, 40(3): 29-35.

- ZHOU Yuli, LU Li. Test and analyse strain on anchorage body of pressure-type rock anchor[J]. Guangzhou Architecture, 2012, 40(3): 29-35.
- [10] 吴曙光, 付红梅, 张岩岩. 拉压分散型锚索锚固机制及工程应用研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2155-2163.  
WU Shuguang, FU Hongmei, ZHANG Yanyan. Study on anchorage mechanism and application of tension-compression dispersive anchor cable[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2155-2163.
- [11] 刘永权, 刘新荣, 杨忠平, 等. 不同类型预应力锚索锚固性能现场试验对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 275-283.  
LIU Yongquan, LIU Xinrong, YANG Zhongping, et al. Field test on anchorage performance of different types of prestressed cables[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 275-283.
- [12] 刘士民. 预应力锚索差异分步张拉法钢绞线实测伸长量误差分析[J]. 城市道桥与防洪, 2012, 7(7): 60-61, 73.  
LIU Shimin. Errors in the measured elongation of the steel strand of the prestressed anchor cable by differential step tensioning[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012, 7(7): 60-61, 73.
- [13] 彭喜军. 压力分散型锚索整体张拉分析与计算[J]. 云南水力发电, 2012, 28(4): 81-85, 102.  
PENG Xijun. The analysis and calculation of pressure dispersion type anchor cable integral tension[J]. Yunnan Water Power, 2012, 28(4): 81-85, 102.
- [14] 周德培, 刘世雄, 刘鸿. 压力分散型锚索设计中应考虑的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1513-1519.  
ZHOU Depei, LIU Shixiong, LIU Hong. Some problems to be considered in desing for compression dispersion-type anchor cables[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1513-1519.
- [15] 张海生, 李锦云. 压力分散型预应力锚索张拉施工工艺研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(S1): 16-20.  
ZHANG Haisheng, LI Jinyun. Study on the construction technology of dispersing pressure prestressed anchor cable [J]. The Chiness Journal of Geoloical Hazard and Control, 2004, 15(S1): 16-20.
- [16] 闫祥梅, 刘洁. 高强螺栓张拉器预应力张拉法施工技术分析[J]. 建筑技术, 2015, 46(12): 1129-1131.  
YAN Xiangmei, LIU Jie. Pre-stressing construction technology analysis of tensioned device for high-strengyth bolts[J]. Architecture Technology, 2015, 46(12): 1129-1131.
- [17] 卓新, 石川浩一郎. 张力补偿算法在预应力空间网格结构张拉施工中的应用[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 38-40.  
ZHUO Xin, Hirochiro Ishikawa. Tensile force compensation analysis method and application in prestressed space grid structures tension construction[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4): 38-40.
- [18] 杨军. 对荷载分散型锚索差异荷载补偿的实践与分析[J]. 路基工程, 2007(2): 70-72.  
YANG Jun. Practice and analyse for indemnifying the differ from loading on anchored calles of decentralized loading[J]. Subgrade Engineering, 2007(2): 70-72.