

# 溪洛渡水电站深厚覆盖层出线竖井结构设计

邱玲<sup>1</sup>, 胡晓文<sup>1</sup>, 李振芳<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072; 2. 河南省林州市弓上水库灌区管理所, 河南 林州 456582)

**摘要:**针对溪洛渡水电站出线竖井规模大、运行要求高、设计标准高、施工难度大的特点,根据结构安全、运行可靠、施工稳妥和经济合理的原则,对出线竖井的结构进行设计,并对原型数据进行监测分析。结果表明目前出线竖井井筒结构能满足覆盖层段施工期和运行期的井壁稳定及强度要求。

**关键词:**覆盖层; 出线竖井; 结构设计; 溪洛渡水电站

**中图分类号:**TV734.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2013)S1-0063-04

## 1 工程布置

溪洛渡水电站位于四川省雷波县与云南省永善县接壤的金沙江溪洛渡峡谷中,是一座以发电为主,兼有拦沙、防洪和改善下游航运等综合利用效益的巨型水电工程。发电厂房为地下式,采用两岸对称布置,两岸地下厂房各配置9台水轮发电机组,单机容量为770 MW,总装机容量13 860 MW。

左、右岸的地下厂房垂直埋深均超过400 m,每岸设两条出线竖井,将500 kV SF<sub>6</sub>管道母线引至地面出线场,左右岸出线场高程分别为865 m和870 m。左岸1号、2号出线竖井内径均为10 m,右岸3号出线竖井内径为10 m,4号出线竖井内径为11 m,竖井底高程为376.50 m,左、右岸竖井总深度分别为488.5 m、493.5 m。左岸竖井穿越覆盖层深度最大在120 m左右,右岸在60 m左右。由于左右岸出线竖井覆盖层段地层基本相同,工程地质问题相似,左岸竖井覆盖土层厚度较大,故本文以左岸出线竖井为代表进行阐述。

## 2 出线竖井工程的特点

**a. 规模巨大。**溪洛渡水电站左右岸出线竖井规模巨大,最大的开挖直径达14.6 m,竖井最大深度达493.5 m,穿越覆盖层深度最大达120 m,对于国内水电工程领域来说,尚没有单位对如此巨大规模和复杂地质条件的竖井进行全面系统的研究,因此设计和施工经验相对欠缺。

**b. 地质条件复杂。**左岸出线场布置在象鼻子

沟上游侧的堆积体斜坡上,前缘地面高程大致在865~880 m之间,地形坡度为5°~10°。根据钻孔揭示场地区域堆积体厚度为59.64~166.9 m。由下至上、从老到新依次为古滑坡堆积体,冰川、冰水堆积体和洪积堆积体。

**c. 设计标准和运行要求高。**目前,国内煤炭行业的竖井一般较水电行业深度深,但竖井的直径相对较小,并且其设计标准与运行条件较水电工程出线竖井要低,特别是像溪洛渡水电站这样大规模的出线竖井结构设计标准和运行要求更高,出线竖井机电设备安装及运行要求井壁水平变位不得大于±50 mm,井壁最大倾斜变形量不得大于150 mm,因此本工程出线竖井的规模、运行和施工要求又不同于煤炭行业,有其自身的特点和难度。

## 3 出线竖井结构设计

### 3.1 开挖方案及结构形式选择

#### 3.1.1 方案比选

根据对国内各行业已建和在建工程施工经验的总结,目前软弱地层竖井施工方法主要有预固结灌浆后边挖边衬施工、地下连续墙施工、沉井法施工、冻结法施工等几种。

溪洛渡水电站出线竖井穿越的覆盖层由洪积堆积体(plQ<sub>3</sub>)、冰川、冰水堆积体(fgl+glQ<sub>21</sub>)、古滑坡堆积体(delQ<sub>21</sub>)组成,土体内随机分布有大量的块碎石、大孤石,除洪积堆积体(plQ<sub>3</sub>)主要由含碎砾石低液限黏土组成,可灌性差外,其余两层为架空结构,可灌性好,地下水不丰富且水位低。洪积堆积体

( $plQ_3$ )段位于覆盖层最上层,若采用预灌法施工,由于其可灌性不好,灌浆难以增强土体的物理力学性能,效果难以保证;若采用沉井法及地连墙施工,由于地层结构不均一,施工难度都大;若采用冻结法,由于无地下水分布,需要充水才能施工。冰川、冰水堆积体( $fgl+glQ_{21}$ )段位于覆盖层中层,若采用沉井法及地连墙施工,由于地层结构不均一,且有架空结构,施工难度都较大。国内较先进的沉井法施工水平为50m,地连墙施工水平为80m,故难以应用;由于可灌性较好,本层优先考虑预灌法施工。古滑坡堆积体( $delQ_{21}$ )位于覆盖层最底层,由于深度太大,沉井法及地连墙法已不适用,本层优先考虑预灌法施工。

综上考虑各层适用方法及各种施工方案的优缺点,组织有关专家进行专题讨论后,最终选用预固结灌浆后边挖边衬施工方案。

### 3.1.2 结构形式选择

在深厚覆盖层中修建竖井,根据不同的设计、施工方法有不同的结构选择形式。对于覆盖层深度小于300m的竖井结构,一般采用单层井壁和双层井壁两种结构形式。双层井壁的优点是一、二衬井壁能够联合承载,增强了井壁的承载能力,同时当一衬井壁的隔水性能较差时,二衬井壁可以承受全部水压,达到防水目的;缺点是一、二衬井壁联合承载,当一衬井壁承受巨大负摩擦力作用时,二衬井壁也承受巨大负摩擦力,即内外层井壁变形基本同步。由于溪洛渡水电站出线竖井地下水位不统一,地层不均一,地质条件比较复杂,电梯及机电设备的运行对出线竖井结构要求比较高,且井壁不允许出现渗水情况,最终选择喷锚支护结合双层井壁复合结构作为溪洛渡水电站出线竖井覆盖层井壁结构,锚杆和内外双层井壁联合承载。

## 3.2 井壁结构设计

### 3.2.1 结构设计方法

在实际工程中进行竖井结构设计常用设计计算方法有古典方法、以竖向附加力为控制荷载的设计方法、弹性地基梁设计方法、锚杆喷混凝土井壁支护结构设计、数值有限元计算方法。根据溪洛渡水电站的工程地质条件、井壁结构类型、井筒埋深等条件选择数值有限元计算方法模拟出线竖井覆盖层段开挖和衬砌施工过程,确定井壁结构厚度及计算井壁结构变形和应力。

### 3.2.2 模拟竖井开挖和衬砌施工过程的有限元计算分析

#### 3.2.2.1 模型参数

a. 几何参数。由于一衬井壁和锚喷支护在施工期间共同承受所有的外荷载,二衬井壁主要承受

井内管道母线荷载和建筑荷载,满足后期兼顾交通、通风、安全疏散和电缆敷设的要求,因此,计算模型中只模拟计算外层井壁结构的施工,不考虑内层井壁联合承载。模型的计算范围 $160\text{m}\times 160\text{m}\times 200\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 深),模型的四周加水平约束边界,底面加竖向约束边界。土体和内衬都采用实体单元,用通用的六面体单元C3D8R和四面体单元C3D4来模拟。整体有限元模型和1号、2号竖井有限元模型见图1和图2。

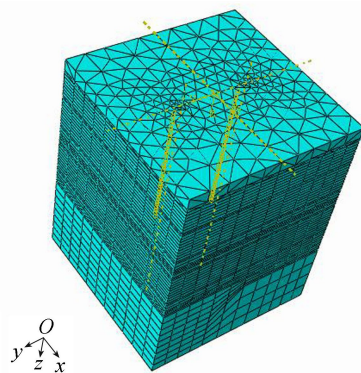


图1 整体有限元模型

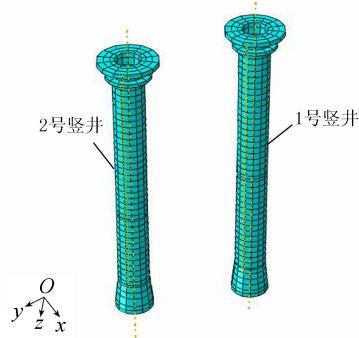


图2 1号和2号竖井有限元模型

b. 物理力学参数。综合考虑地质资料及有关试验材料后,将覆盖层简化为3层,工程地质材料计算参数见表1。混凝土按弹性考虑,弹性模量 $E=3.15\times 10^4\text{MPa}$ ,泊松比 $\nu=0.2$ ,密度 $\rho=2500\text{kg/m}^3$ 。井周支护简化处理。根据以往工程经验,对锚杆可以通过改变土体弹性模量和塑性参数进行处理。

表1 覆土层岩土力学计算参数

土体类型	天然密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	变形 模量/ MPa	内摩 擦角/ ( $^\circ$ )	黏聚力/ MPa	1号竖井 土层 厚度/m	2号竖井 土层 厚度/m
洪积堆积体	2.00	30	16	0.015	28	34.8
冰川、冰水 堆积体	2.35	60	30	0.050	38	49.0
古滑坡 堆积体	2.25	40	27	0.050	48	41.0

#### 3.2.2.2 计算荷载及工况组合

本模型主要模拟出线竖井覆盖层段开挖和衬砌施工过程,所涉及到的主要荷载是土压力、水压力、

重力以及摩擦力。

### 3.2.2.3 计算结果及分析

**a. 井壁结构厚度及混凝土强度等级。**冰川冰水积物层以上一衬井壁厚度 1.2 m, 冰川冰水积物层以下采用渐变体型, 古滑坡残体层底部控制厚度为 1.5 m。混凝土强度等级采用 C40。

**b. 井壁变形和应力计算结果及分析。**为了表述方便, 所有工况建立统一的参考坐标系: 除特别说明外, 以下计算结果均以上述坐标系作为参考坐标系。衬砌的应力和变形结果见表 2。以 2 号竖井来分析, 衬砌外表面的径向变形、压应力随深度变化的曲线见图 3 和图 4。

表 2 1 号和 2 号竖井的应力和变形结果

竖井	最大主应力		最小主应力		x 方向最大变形		y 方向最大变形	
	大小/ MPa	至竖井 顶距 离/m	大小/ MPa	至竖井 顶距 离/m	大小/ mm	至竖井 顶距 离/m	大小/ mm	至竖井 顶距 离/m
1 号	10.57	56	-9.418	107	20.05	35	30.22	62
2 号	9.80	68	-13.920	125	19.93	92	35.87	83

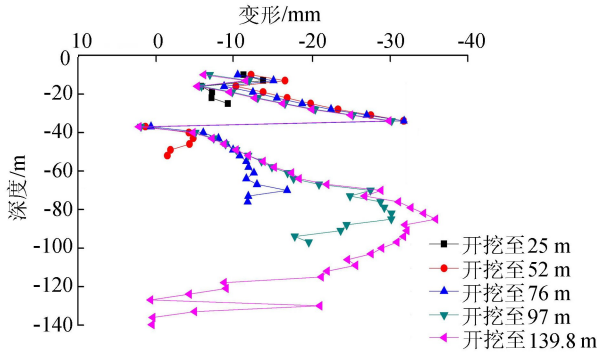


图 3 衬砌径向变形随深度的变化曲线

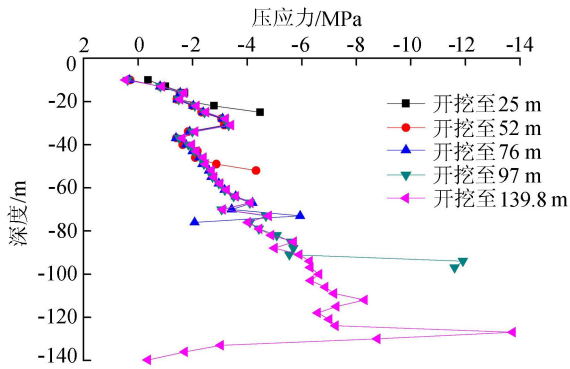


图 4 衬砌压应力随深度的变化曲线

从图 3 和图 4 可以看出, 衬砌外表面各点径向变形随着开挖深度的加大而逐渐增大, 覆盖层开挖完成时各点变形达到最大, 最大变形发生在覆盖层底部, 其值为 35.87 mm, 因此开挖前应事先预留一定的开挖空间。还可以看出, 在土层交界处径向变形发生明显突变, 当由变形模量较小的洪积堆积体进入变形模量较大的冰川、冰水堆积体时, 衬砌变形突

然减小, 径向变形随深度逐渐增加, 而由冰川、冰水堆积体进入古滑坡堆积体时内衬变形出现拐点, 径向变形随深度逐渐减小。衬砌压应力也在地层交界处发生了突变和拐点, 而在同一地层又出现连续性的变化特点。衬砌径向变形和压应力的变化, 也表明了弹性模量不同的土体、基岩所产生的水平侧压力的变化情况和各自对衬砌的侧向变形不同的约束程度。

**c. 井周土体的水平和竖向位移情况。**井周土体的径向位移随着开挖深度的增加而逐渐下移和增大, 覆盖层开挖完成时出现最大位移, 最大位移发生在覆盖层底部, 其值为 58.4 mm。井周土体的竖向位移在没有开挖到基岩时, 随深度的增加而逐渐下移和增大, 在开挖面附近出现大的竖向位移, 到开挖到基岩后, 位移不再随开挖面下移, 停止在基岩的上部区域。

**d. 井壁配筋设计。**出线竖井井壁配筋按平面圆筒计算, 根据数值有限元计算方法计算出来的井壁结构应力, 采用沿周边均匀配置纵向钢筋的环形截面偏心受压构件来进行井壁正截面受压承载力计算和斜截面承载力计算。按最大拉应力进行结构配筋, 配筋结果: 内层竖向钢筋 28@17, 外层竖向钢筋 28@20, 内外层环向钢筋 28@20。

## 4 原型监测分析

### 4.1 监测数据

左岸出线场及出线竖井实施的监测项目有 9 类: 观测墩、测斜管、渗压计、钢筋计、应变计组、无应力计、测缝计、锚杆应力计、水准点。出线竖井支护锚杆时间~应力过程线见图 5, 一衬井壁混凝土钢筋应力见图 6, 左岸出线场变形测点时间~位移过程线见图 7。

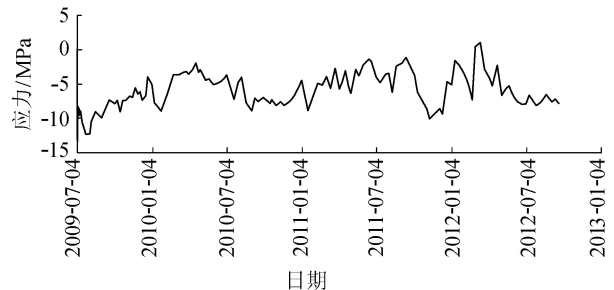


图 5 1 号出线竖井 734.5 m 高程锚杆应力计 (Rr1-SJL) 应力-时间过程线

### 4.2 数据分析

由图 5~7 可见, 出线竖井锚杆应力、井壁混凝土钢筋应力及变形测点位移值均在设计范围内, 并已趋于收敛。根据出线竖井上段开挖过程中的监测数据的变化趋势, 左岸出线竖井上段覆盖层段开挖

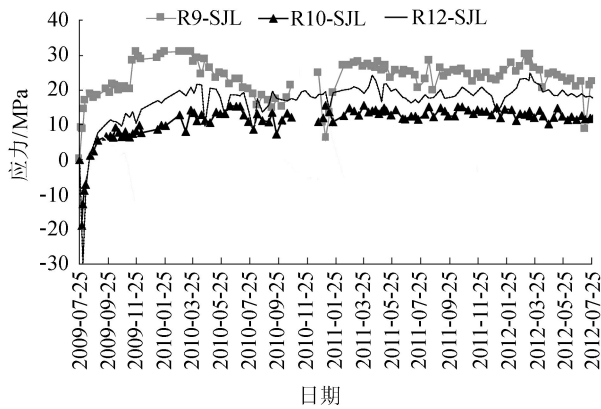


图6 2号出线竖井一衬井壁735.5高程  
钢筋计应力-时间过程线

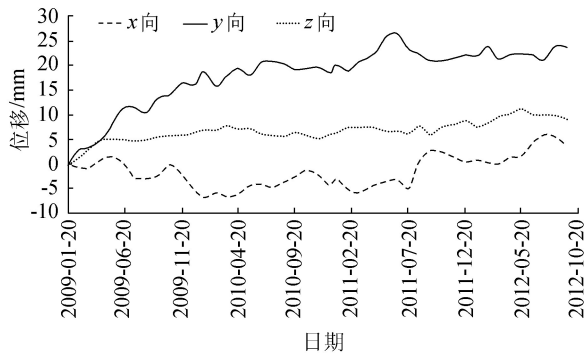


图7 左岸出线场变形测点时间-位移过程线

支护完成后,变形值和增量值总体较小,说明系统支护参数基本上是合理的,在当前支护条件下,覆盖层段出线竖井的稳定是有保障的。

## 5 结语

根据计算分析成果以及开挖支护完成后的监测

(上接第57页)

大的计算功能也能很好地模拟诸如聚类分析法在内的许多已经成熟的方法,从而极大地减轻计算工作量,提高了工作效率。

## 6 结语

利用地理信息系统和遥感等高新技术对余姚市水资源进行有效监控、优化配置和合理保护,减轻了水资源监控的工作量,提高了工作效率,有助于解决当地水资源污染严重的问题。随着余姚市水利事业的不断发展和水资源领域所涉及范围的不断拓宽,地理信息系统这个“大管家”以及遥感技术这双“天空之眼”将会得到更广泛的应用。

数据分析,目前出线竖井井筒结构能满足覆盖层段施工期和运行期的井壁稳定及强度要求。由于溪洛渡水电站出线竖井的施工方案是采用目前矿井和隧道竖井的常用做法,即自上而下逐层开挖土体逐层直接施工一衬的方法,竖井的筒体结构考虑由自上而下的各层井圈(一衬)承受土压力,各圈结构之间没有可靠的竖向连接,因此要对筒体结构受温度、受各层土体作用的平面错动、受筒体外土层产生的沉降回弹等对结构的不利影响进行高度关注。对于水电工程来说,尚未有类似规模建成的竖井,因此施工期不确定因素较多,应考虑对井壁结构和井壁位移进行施工监测,一方面可以通过数据反馈及时调整施工工艺参数进行信息化施工,保证施工安全;另一方面可以得到第一手数据,以便为今后设计施工同类型竖井提供依据。

## 参考文献:

- [1] 刘希亮. 深厚表土不稳定地层中井壁受力研究[M]. 北京:煤炭工业出版社,2004.
- [2] 马英明. 立井厚表土层地压的理论与实践[J]. 中国矿业学院学报,1979(1):45-69.
- [3] 吕恒林. 深厚表土中井壁的力学特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学建筑工程学院,1999.
- [4] 何满潮,孙晓明. 中国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [5] 路耀华,崔增祁. 中国煤矿建井技术[M]. 北京:中国矿业大学出版社,1995.

(收稿日期:2013-03-10 编辑:骆超)

## 参考文献:

- [1] 陈永文. 自然资源学[M]. 上海:华东师范大学出版社,2008.
- [2] 黄杏元. 地理信息系统概论[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [3] 奥勇. 遥感原理及遥感图像处理实验教程[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2009.
- [4] 王式成. 水文水资源技术与实践[M]. 南京:东南大学出版社,2009.
- [5] 詹道江,叶守泽. 工程水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1987.
- [6] 刘志强. 浅谈水利信息化在建设和谐水利中的作用[J]. 湖南水利水电,2006(5):130-131.

(收稿日期:2012-09-21 编辑:骆超)