

# 建于深厚覆盖层上的阴坪水电站闸坝设计 及基础处理

王菊梅

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,四川成都 610072)

**摘要:**在结构层次复杂的深厚覆盖层上修建水工建筑物,为了满足地基基础承载力、不均匀沉降要求并提高基础内砂层抗液化的能力,对阴坪水电站闸坝基础覆盖层进行了振冲碎石桩加固处理,加固深度最大达26 m。通过振冲及填料挤压置换形成复合地基,提高了闸坝地基的承载力、抗剪强度和抗变形能力,对防止地基液化起到了很好的作用。

**关键词:**阴坪水电站;基础处理;基础承载力;地基液化;振冲碎石桩

中图分类号:TV22;TV64;TV223

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2013)01-0011-03

## 1 概述

阴坪水电站位于四川省平武县涪江上游支流火溪河上,为火溪河梯级“一库四级”开发方案中的最下游一级,系低闸引水式开发的单一发电工程。电站总装机容量100 MW,安装2台单机容量50 MW的发电机组。主要建筑物由首部枢纽、引水系统和厂区枢纽组成。首部枢纽建筑物从左至右由左岸挡水坝、泄洪闸、冲沙闸、电站取水口及右岸挡水坝组成,闸坝最大高度为35 m。工程等别为Ⅲ等,永久性主要建筑物按3级设计。

首部枢纽河段为不对称的“U”型河谷,两岸基岩出露,岩性为灰白色二云母石英片岩;河床覆盖层厚度为28.1~106.77 m,主要由砂卵石、砂及壤土组成,按成分和粒度的差异自上而下可分为8层(表1)。

表1 闸基覆盖层分层表

序号	土层性状	厚度/m	允许承载力/MPa
⑧层	粉砂质壤土层	0~5.92	
⑦层	含漂砂卵石层	2.83~8.25	0.4~0.5
⑥层	粉砂质壤土层	0~8.78	0.18~0.2
⑤层	粉细砂中粗砂层	2.37~20.16	0.14~0.18
④层	粉砂质壤土层	0~8.52	0.2~0.25
③层	块碎石土层	0~8.47	0.35~0.4
②层	粉砂质壤土层	0~18	0.25~0.3
①层	含漂砂卵石层	0~55.21	0.5~0.6

闸坝基础存在的主要地质问题:一是天然地基⑥层、⑤层承载力较低;二是在地震作用下⑥层、⑤层存在液化的可能性。根据闸坝基础地质

条件,经综合分析比较,设计对闸坝基础提出了采用振冲碎石桩复合地基加固处理方案,加固深度最深达26 m,不但满足了抗液化的条件,同时满足了闸坝建筑物承载力、抗剪强度和抗变形能力的要求,亦满足了渗透稳定条件。

## 2 闸、坝设计

### 2.1 首部枢纽布置及主要建筑物设计

首部枢纽采用“正向泄洪冲沙、侧向取水”的布置型式,枢纽建筑物从左至右由左岸7个挡水坝段、2孔泄洪闸、1孔冲沙闸、2孔电站取水口及1个右岸挡水坝段组成。左、右岸挡水坝段均采用混凝土重力坝坝型,坝顶宽8 m,左岸挡水坝段长119.5 m,最大坝高29.5 m;右岸挡水坝段长22 m,最大坝高33.5 m。

为保证泄洪、冲沙顺畅,将泄洪闸和冲沙闸尽量布置在主河道上。根据闸址的地形地质条件、枢纽建筑物泄洪能力和冲沙要求并综合考虑水库排沙需要,确定在主河床布置2孔泄洪闸、1孔冲沙闸,坝段总长50 m,闸宽29.95 m,坝顶宽12 m,最大闸高35 m。为了减小闸门挡水高度,泄洪闸、冲沙闸均设置胸墙,胸墙前为平板检修闸门,胸墙后为弧形工作闸门,泄洪闸孔口尺寸为6 m×10 m(宽×高),冲沙闸孔口尺寸为3 m×10 m(宽×高)。为减轻闸室的磨损,在泄洪闸、冲沙闸工作闸门后的底板表层及闸墩底部1.2 m高度范围均采用C40HF抗冲耐磨混凝土保护。闸室上游设25 m长钢筋混凝土铺盖,下游设50 m长斜坡式护坦和35 m长钢筋混凝土海漫。

收稿日期:2012-12-07

闸坝基础均为覆盖层,河床部位基础防渗采用1 m厚悬挂式防渗墙,深入②层相对不透水层;两岸坝肩为卸荷带,透水性较强,采用帷幕灌浆处理。

## 2.2 闸、坝稳定计算

设计依据《水闸设计规范》规定,对闸坝在各组合工况下的地基整体稳定应力、地基沉降和地基渗流稳定性进行了计算分析。其结果表明:泄洪冲沙闸及挡水坝各坝段沿建基面的稳定安全系数满足《水闸设计规范》(SL 265-2001)要求,但安全富裕度不大;由于地基结构层次复杂,其软弱下卧层不满足承载力要求且存在液化的可能,应采取相应的基础处理措施,提高下卧各层的承载力和抗液化能力。

## 3 闸坝基础处理设计

首部枢纽建筑物布置时,设计考虑到第⑦层的天然地基承载力为0.4~0.5 MPa,故将各建筑物建基面均放在⑦层上。但因⑦层厚度较薄,建基面以下厚度不足5 m,部分闸坝段齿槽已位于⑥层上,且第⑦层以下的第⑥层、第⑤层分别为粉砂质壤土和砂层,属软弱下卧层,天然地基承载力很低。根据闸坝稳定及基底应力计算成果,闸坝地基不满足建筑物承载要求,且地质判别第⑤层、第⑥层为液化土层。为了提高基础下卧层的承载力、抗变形能力及抗剪强度,防止基础第⑤层、第⑥层液化,经综合比较分析,最终决定采用振冲碎石桩对闸坝地基进行加固处理。

### 3.1 振冲处理设计原则

处理的目的是提高下卧层地基承载力,防止第⑤层、第⑥层液化,满足闸坝基础各种稳定条件。故设计应根据《水闸设计规范》和《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》(DL/T5214-2005),结合阴坪水电站地基结构复杂,基础长期处于水下,挡水高度大,最大闸坝高35 m的特点,合理确定振冲碎石桩的范围、桩径、桩距和桩深等参数。

### 3.2 振冲碎石桩复合地基的设计要点

根据阴坪水电站首部枢纽地质条件和计算分析成果确定的振冲处理范围包括挡水坝段、电站取水口闸、泄洪冲沙闸、铺盖及护坦边墙的地基,并考虑了一定的护桩范围。设计要点主要是提高地基承载力,防止沙层液化,验算地基渗流稳定

性,确定振冲碎石复合地基各项参数等。

#### 3.2.1 复合地基承载力验算

(1)下卧软弱层承载力较低,振冲处理后,要求作用在顶面处的附加应力及自重应力之和不超过此层修正后的承载能力,即:

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az}$$

式中  $p_z$ 、 $p_{cz}$ 、 $f_{az}$  为软弱下卧层顶面处的附加应力标准值、自重应力标准值、经深度修正后地基承载力特征值(kPa)。

(2)修正后的地基承载力特征值计算公式:

$$f_{az} = f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 15)$$

式中  $f_{az}$ 、 $f_{ak}$  为修正后地基承载力特征值、地基承载力特征值(kPa);  $\gamma$ 、 $\gamma_m$  为基础以下土的重度、基础以上土的加权平均重度(地下水水位以下取浮重度),  $\text{kN/m}^3$ ;  $b$ 、 $d$  为基础底面宽度(当基础底宽小于3 m时按3 m考虑,大于6 m时按6 m考虑)、埋置深度(m);  $\eta_b$ 、 $\eta_d$  为基础宽度和埋深的地基承载力修正系数。

(3)对于矩形基础,附加应力  $p_z$  的计算公式:

$$p_z = \frac{blp_0}{(b + 2Z \tan \theta)(1 + 2Z \tan \theta)}$$

式中  $p_0$  为基底平均应力标准值,  $\text{kPa}$ ;  $b$ 、 $l$  为矩形基础底边的宽度、长度(m);  $Z$  为基础底面下土层的厚度;  $\theta$  为地基压力扩散角, ( $^\circ$ )。

当  $Z < 0.25b$  时,不考虑压力扩散角作用,取  $\theta = 0$ 。

(4)振冲桩复合地基承载力计算公式:

$$f_{spk} = mf_{pk} + (1 - m)f_{sk}$$

$$m = \frac{d^2}{d_s^2}$$

式中  $f_{spk}$ 、 $f_{sk}$ 、 $f_{pk}$  为复合地基的承载力标准值、桩间土承载力标准值、桩体单位截面积承载力特征值(kPa);  $m$  为面积置换率;  $d$ 、 $d_s$  为桩的直径、等效影响圆的直径(等边三角形布置  $d_s = 1.05s$ ,  $s$  为桩的间距, m)。

地基承载力验算成果见表2。

从表2中的计算分析成果可见:当采用桩间距1.5 m时,经振冲桩处理后,复合地基承载力可满足要求。第④层(闸基以下23 m)承载力满足要求,不需处理,故振冲桩应深入闸基以下23 m,局部最深达26 m。

#### 3.2.2 现场试验和检验

表 2 闸、坝地基软弱下卧层承载力验算成果表

项 目	部 位					
	闸基平均应力			闸基最大应力		
	⑥层顶	⑤层顶	④层顶	⑥层顶	⑤层顶	④层顶
原始地基承载力 $f_{ak}$	190	160	225	190	160	225
基底应力 $p_z$	392	392	324.6	484	484	400.8
地基自重应力 $p_{cz}$	18.5	37.9	209.7	18.5	37.9	209.7
下卧层顶部总应力 $p_z + p_{cz}$	410.5	429.9	534.2	502.5	521.9	610.5
修正后原始地基承载力 $f_{ak}$	204.3	262.4	537.2	204.3	262.1	537.2
原始地基是否满足要求	否	否	是	否	否	是
考虑宽深修正振冲处理后地基承载力 $f_{ak}$ 应达到值	361	292		370	299	
1.5 m 间距振冲桩复合地基承载力 $f_{ak}$	360 310		360	310		
2 m 间距振冲桩复合地基承载力 $f_{ak}$	300	240		300	240	
振冲桩处理应选用的间距 /m	1.5	1.5		1.5	1.5	

注：最大应力按不大于地基承载力的 1.2 倍考虑。

对现场进行了复合地基试验及检测,以验证及调整设计指标的合理性,并作为施工控制及检测方法的依据。试验振冲碎石桩按等边三角形布

置,桩径为 1 m,桩距按 1.5 m 和 2 m 布置,分别对第⑥层、第⑤层进行了标贯、重力触探和剪切波试验和检验,其成果见表 3。

表 3 闸址区⑥、⑤层振冲复合地基物理力学参数建议值表

振冲桩距	层次	土体名称	渗透系数 $k$ /cm · s <sup>-1</sup>	允许坡降 $i$	破坏类型	压缩模量 $E_s$ /MPa	允许承载力 [R] /MPa	抗剪强度	
								$\varphi$ /°	$c$ /MPa
2 m	⑥	粉砂质壤土	$2.64 \times 10^{-4}$	0.5 ~ 1	流土或管涌	14 ~ 17	0.28 ~ 0.32	22 ~ 24	0
	⑤	砂层	$6.95 \times 10^{-2}$	0.15 ~ 0.2	管涌	20 ~ 23	0.23 ~ 0.25	22 ~ 25	0
1.5 m	⑥	粉砂质壤土	$6.71 \times 10^{-4}$	0.5 ~ 1	流土或管涌	18 ~ 22	0.35 ~ 0.37	26 ~ 27	0
	⑤	砂层	$1.06 \times 10^{-3}$	0.15 ~ 0.2	管涌	25 ~ 29	0.30 ~ 0.32	25 ~ 27	0

试验成果表明:采用振冲碎石桩进行地基处理后,形成的复合地基承载力标准值、压缩模量及抗剪指标均有所提高。剪切波初判间距 1.5 m 和 2 m 振冲区第⑥层、第⑤层均不液化,标贯试验复判第⑥层可能液化、第⑤层不液化。因碎石桩有排水减压作用,判别第⑥层液化可能性较小。

### 3.2.3 复合地基的主要参数

根据计算分析和现场试验检测成果,确定复合地基的主要参数为:振冲碎石桩按等边三角形布置,桩径为 1 m。泄洪、冲沙闸、取水口、右岸挡水坝段、左岸 1 ~ 3 挡水坝和上游护桩范围基础桩间距为 1.5 m;左岸 4# ~ 5# 挡水坝、铺盖上游侧、挡水坝段及泄洪冲沙闸段下游护桩,护坦边墙基础桩间距为 2 m;6# 挡水坝基础不作处理;如桩深完全穿透第⑤层,局部深度将超过 30 m。综合考虑施工进度和施工难易,结合软弱下卧层的复核结果对桩长进行了优化,确定闸室基础以下桩长为 23 m,挡水坝段局部最大深度为 26 m。

### 3.2.4 三维渗透稳定计算

在地基采用振冲碎石桩加固处理后,可以提高地基承载力和抗变形的能力,但地基的渗透性

能也有所改变,渗透系数较原来增大。为了解闸坝基础渗透稳定情况,设计采用有限元三维渗流稳定计算程序对闸坝基础渗透稳定进行了复核。计算中考虑了闸坝基础振冲处理与不处理两种方案,差别主要是计算采用的渗透系数不同。

经对计算成果进行对比分析后得知,闸坝基础经过振冲处理后,虽然地基渗透系数变大,但由于在河床部位防渗墙已深入到相对不透水层(第②层),与岸坡深入基岩的防渗帷幕相接,基础渗透稳定要求能够满足。

### 3.2.5 震后复核情况

2008 年“5.12 地震”时,工程正处于施工期,首部枢纽的振冲处理、护坦边墙和部分挡水建筑物的底部已经施工。震前,地震设防烈度为 7 度,地震基岩峰值加速度为 0.1 g;地震后根据 GB18306-2001《中国地震动参数区划图》国家标准第 1 号修改单,阴坪水电站的地震烈度为 8 度,基岩峰值加速度为 0.2 g。对闸坝稳定和应力进行复核计算,在不影响泄洪、冲沙等枢纽布置格局,且不改变已经施工建筑物结构和振冲处理后

(下转第 41 页)

高程736 m以上的坝体分为5个坝段,且溢流坝段为常态混凝土。从左至右为:左岸碾压混凝土推力墩、左岸碾压混凝土非溢流坝段、溢流坝段、右岸碾压混凝土非溢流坝段、右岸碾压混凝土推力墩。在溢流坝段增加了2条施工横缝。

大坝分仓从右至左具体为:右岸临时横缝以右,包括右岸推力墩、右岸非溢流坝段、进水口和第四溢洪道部分为1#仓;右岸施工缝和临时横缝之间,包括第三、第四溢洪道部分为2#仓;两条施工缝之间部分,包括第二、第三溢洪道部分为3#仓;左岸缝和临时横缝之间,包括第一、第二溢洪道部分为4#仓;左岸临时横缝以左,包括左岸推力墩、左岸非溢流坝段和第一溢洪道部分为5#仓,其中,2#、3#、4#仓为常态混凝土,1#、5#仓为常态和碾压混凝土均有。

在高程736 m架设超出溢流面的皮带机系统输送混凝土。根据浇筑需要,皮带机的安装和使用分为两期。一期皮带机具体布置为:利用原真空溜槽的储料斗和皮带机为0#皮带机,在5#仓内布置1#皮带机,跨1#~5#仓布置80 m长的2#皮带机,中间采用移动分料小车接皮筒布料,1#仓内跨常态和碾压混凝土布置3#皮带机,以满足高程752 m以下各部位、各种混凝土浇筑的需要。二期皮带机布置改3#皮带机为4#皮带机,满足右

岸高程752 m以上各种混凝土的浇筑需要。在浇筑过程中,溢流面及墩墙硅粉混凝土采用泵送辅助入仓,同时浇筑。

皮带机安装用时28 d。自2010年6月12日皮带机安装调试完成后开始进行高程736 m以上混凝土的浇筑,于2010年12月10日浇筑至高程758.6 m,完成了高程736 m以上碾压和常态混凝土的浇筑。

## 5 结 语

巴基斯坦高摩赞大坝为碾压混凝土曲线形重力坝。坝址河谷狭窄、两岸高陡、岩石条件较差、施工道路布置困难。鉴于混凝土的水平运输和垂直运输的解决方案是大坝浇筑能否顺利进行的关键,故根据地形地质条件和大坝的布置特点,按高程采用了三种不同的混凝土入仓方式:大坝下部采用自卸汽车直接入仓,大坝中部通过真空溜槽卸入仓内由自卸汽车入仓,大坝上部采用皮带机系统输送混凝土,充分体现了因地制宜、因陋就简、力求节约的原则,取得了较好的经济效益。

### 作者简介:

程勇清(1971-),男,四川威远人,项目总工程师,高级工程师,一级建造师,二级结构师,从事小型水电站结构设计、低层民用建筑设计、招投标施工组织设计以及水电站工程施工。

(责任编辑:胡友权)

(上接第13页)

的地基承载力的情况下,对原结构体型仅进行了局部调整,即将闸室段宽度调整为30.95 m,长度调整为51 m,护坦长度缩短1 m,为49 m。调整后的闸坝稳定应力及下卧层承载力满足要求。

## 4 基础处理结论

(1)阴坪水电站首部枢纽闸坝基础处理的重点是提高基础的承载力和抗变形能力。振冲计算分析和试验成果表明:基础经过振冲碎石桩加固处理后,可以提高地基承载力和抗变形能力,基本解决了第⑤层、第⑥层的液化问题。

(2)闸坝基础经过振冲处理后,因桩体的渗透系数大,使复合地基的渗透系数变大,但防渗墙已经深入到第②层相对不透水层,经对闸(坝)基础进行三维渗透计算分析后得知,其渗透稳定满足要求。

(3)基础处理是本工程安全运行的关键,但

在实际施工过程中,有些因素会制约振冲桩(或复合地基)的质量,如:①采用级配良好的碎石,能更好的提高桩体及复合地基的抗剪强度;②地层中存在的漂木、孤石等对振冲桩的施工有很大影响;③施工方法、施工工序、填料质量和数量、留振时间、塌孔等。应特别重视加强振冲桩的施工质量检查。

“5.12”汶川特大地震后,在对主震区多个水电工程的分析证明:对于地震区的水工建筑物设计,应遵循“确保安全、留有余度”的原则,确保挡水建筑物在设计地震工况下不溃坝、能修复,以便最大限度地减轻地震灾害的影响。

### 作者简介:

王菊梅(1967-),女,四川双流人,副设计总工程师,高级工程师,学士,注册土木工程师(岩土),从事水工建筑物设计工作。

(责任编辑:胡友权)