

# 吉牛水电站厂房基础引孔振冲碎石桩施工

姚福拴

(中国水电基础局有限公司 三公司,四川 成都 610213)

**摘要:**吉牛水电站厂房基础振冲桩设计承载力高、地质条件复杂、施工难度大。施工采用了砂卵石层冲击钻引孔+下部振冲器造孔的方案,通过对150 kW振冲器进行技术改造等途径,突破了振冲桩施工的局限,成功完成了含砂卵石的复杂地基内振冲桩的施工。

**关键词:**吉牛水电站;振冲桩;施工

**中图分类号:**TV7;U655.55+1

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2012)02-0180-06

振冲碎石桩作为一种软基处理方法,常用于加固港口、道路、建筑等软粘土、松砂地基。自1977年引进我国以来,因其具有设备简单、施工方便、经济快捷等优点,在我国得到了广泛应用,并取得了良好效果。振冲碎石桩在水电工程中也得到了广泛的推广及应用。鉴于水电工程一般修建在大河大江上或山区,地层一般都比较复杂,施工难度大,经常会遇到需要处理漂卵石层下砂层的问题,如四川铜街子水电站左岸堆石坝坝基、阴平水电站闸坝基础、龙头石水电站坝基粉细砂层处理等。在此类地层中,振冲施工漂卵石层的穿透成为一大难点,如古城水电站,其地基细砂层上覆盖漂砂卵石在施工时只打了5 m左右就打不下去,被迫改用高压旋喷灌浆处理地基。处理类似地层的施工方法一般有三种:一是施用大功率的振冲器强行穿透砂卵石层处理其下部的砂层,如四川铜街子水电站左岸堆石坝坝基,此法一般适用于砂卵石层比较松散、厚度较小的地层;二是对上部的砂卵石层进行开挖后再处理其下部的砂层,此方法一般适用于地下水位较低、砂卵石层较薄的地层;三是利用冲击钻引孔穿过上部的砂卵石层再处理下部的砂层,如阴平水电站及龙头石水电站坝基处理,此方法对地层的适应性较好,但引孔增加费用较多,不够经济。笔者以吉牛水电站厂房基础振冲碎石桩施工为例,对引孔法振冲施工工艺及技术进行探讨,以供类似工程施工参考。

## 1 工程概况

吉牛水电站位于四川省丹巴县革什扎河流域

收稿日期:2012-01-08

下游河段,属革什扎河流域水电规划一库四级方案中的第四级梯级电站,为引水式发电。厂房为地面厂房,共装2台冲击式水轮发电机组,总装机容量 $2 \times 120$  MW。

因地基承载力不满足设计要求,故对厂房基础进行振冲碎石桩加固处理,同时消除砂层液化的可能。

## 2 工程地质条件

厂址位于革什扎河口上游200 m的大金川河右岸I级阶地上,覆盖层最大厚度约41.33 m,层次结构复杂。根据设计前期地质资料,地层自下而上可分为三层:

①砂卵石层:系冲积堆积,分布于谷底基岩之上,受基岩面起伏影响,该层分布不连续,厚度变化于0(CZK02孔)~6.65 m(CZK01孔)之间,顶板埋深约34.68 m。卵石成分主要为二云英片岩,卵石粒径一般为6~8 cm,含量约15%,砾石粒径一般为0.2~1 cm及2~4 cm,含量约为55%,余为粉细砂,总体结构较均一。

②粉细砂层:冲积堆积,分布于①层、块碎石土、基岩之上,厚度5.66(CZK03孔)~19.83 m(CZK01孔),顶板埋深11.28~16.94 m,砂为含泥粉细砂,层中偶见粒径为1~3 cm的砾石。

③砂卵石层:冲积堆积,位于I级阶地上部,层厚11.28~16.94 m,卵石成分主要为二云英片岩,卵石粒径一般为6~10 cm,含量约15%,砾石粒径一般为2~4 cm,少量为0.5~1 cm,含量约为40%。砂为灰黄色中细砂,约占40%。地表1~2 m深度范围内分布少量直径为

20~25 cm 漂石, 充填物为粉细砂。在该层下部分布有一层厚约0.4 m 的含泥粉细砂透镜体。另外, 在地表局部分布有③a 含砾中细砂层, 钻孔揭示厚度为4.2 m。

### 3 试验桩施工

#### 3.1 试验目的

选择有代表性地段进行振冲试验, 以验证振冲加固处理的效果。

(1) 通过试验取得地基振冲桩参数和振冲加固后第②和③a 层的抗液化能力及复合地基的抗剪强度、承载力和压缩模量等指标。

(2) 确定最佳振冲碎石桩桩径、桩间排距、桩长、填料级配及数量等参数。

(3) 选定造孔和成桩的施工机械、施工工艺, 确定施工技术参数(每米进尺填料量、密实电流、留振时间、振冲水压等), 为大面积振冲碎石桩施工取得合理的参数。

(4) 为基础振冲碎石桩施工取得质量检验的方法和求。

#### 3.2 试验桩布置

根据现场条件及工期要求, 设计单位对试验孔布置如下: 试验区分为 S1、S2、S3 三个区, 每个区布置3个孔, 成等边三角形布置。S1 区孔间距2.5 m, S2 区孔间距2.2 m, S3 区孔间距3 m。S1 区桩孔深32 m 左右, S2 区桩孔深32 m 左右, S3 区桩孔深33 m 左右, 设计桩径为1 m。

#### 3.3 施工方案

在施工过程中, 首先采用“直接振冲”方案施工, 在经过一段时间试验后, 证明用振冲器无法直接穿透③层。遂将方案改为“冲击钻引孔后振冲”的方法施工, 即先用冲击钻引孔穿过③层, 再用150 kW 振冲器对其下部造孔至设计孔深后填料加密的方案。

#### 3.4 试验设备

振冲施工采用 ZCQ-130 和 ZCQ-150 型振冲器, 辅助造孔设备采用 CZ-30 型冲击钻机, 振冲器起吊设备使用50 t 履带吊车并由25 t 汽车吊配合施工, 水泵使用 ISO80-50-315 型离心泵。

#### 3.5 施工工艺流程

施工工艺流程见图1。

#### 3.6 试验参数

经过反复试验后选定的施工参数见表1。

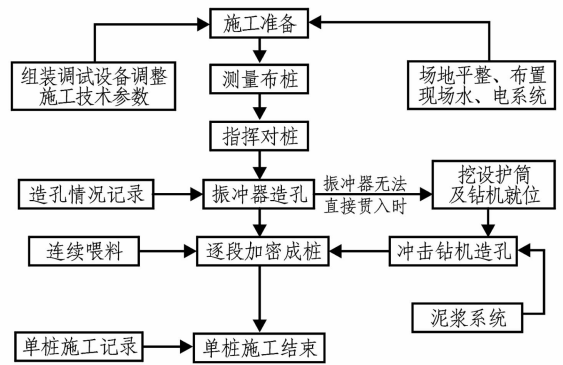


图1 振冲试验施工工艺流程图

表1 振冲施工参数表

项目	造孔水压 /MPa	造孔电流 /A	加密水压 /MPa	加密电流 /A	留振时间 /s
数值	0.6~1.2	160~290	0.1~0.5	140~160	10

#### 3.7 碎石桩填料技术要求

碎石桩填料采用具有良好级配的碎石, 粒径控制在20~100 mm 之间, 个别最大粒径不超过150 mm, 小于5 mm 粒径的含量不超过10%。

#### 3.8 施工过程

##### (1) “直接振冲”试验。

在原定试验区附近选点进行试验。试验共计造孔28个。直接振冲孔的施工过程如下:

施工高程分别为1 865.5 m(3个孔)以上、1 862.3 m(19个孔)及1 859.6 m(包括开挖的坑内)(6个孔), 施工最大孔深分别为11.5 m(底高程1 853.7 m)、10.4 m(底高程为1 851.9 m)、5.5 m(底高程为1 854.1 m), 最大电流达到300 A, 水压范围为0.5~1.4 MPa。在1 865.3 m及1 862.3 m 高程平台施工时上部电流高、振动感强烈, 明显感觉到有大的漂卵石, 施工至4~5 m 时电流明显下降、振动感减弱, 穿透卵石层进入砂砾石层, 进度缓慢, 当施工孔深达到9 m 以下时造孔速度极其缓慢, 基本没有进尺。在1 859.6 m 高程平台(包括开挖的坑内)施工时, 5 m 以上电流较大, 缓慢下振, 当深度达到5 m 时, 振动剧烈, 明显感觉到有大的石头存在, 振冲器无法向下走。

施工中采取的措施及效果:

①改变水压及水量, 采取不同的水压(水压范围0.5~1.4 MPa)进行试验, 另外增加了一个旁通水管以增加水量。利用大流量、高压水流及振冲器的振动力给密实的砂卵石层形成一个液化环境, 减小振冲器的下降阻力。

②施加压力,利用装载机自重给振冲器施加外部压力,增加其穿透能力。

③开挖上部砂卵石,利用挖掘机开挖上部砂卵石(由于水下开挖不下去,未将砂卵石挖穿)。

④增设变频器,利用变频器改变振冲器振动频率,达到与地层相适应的最佳击振频率,增强设备的穿透性。

通过增加旁通水管及装载机的附加压力,造孔孔深由原来的6 m加深至9.2 m(1 862 m高程平台相比较);通过增设变频器,造孔孔深达到10.4 m。通过采取增设旁通水管、施加外部压力及调节振动频率等措施,造孔深度有所提高,但造孔速度仍很慢,而且到9~10 m后造孔十分困难。

以上试验结果表明:采用“直接振冲”的方法无法贯穿第③层。通过四方会议,最终确定采用“冲击钻造引孔后振冲”的方案施工。

(2)“冲击钻造引孔后振冲”试验。

①引孔直径为80 cm,孔位偏差不大于5 cm。造孔前人工进行护筒埋设,护筒直径100 cm,护筒埋入工作平台以下1.8 m,工作平台以上留0.2 m。护筒采用8 mm厚钢板卷制而成。造孔设备选用CZ-30型冲击钻机配备十字钻、空心钻等钻具施工。共完成9根桩的试验,引孔工程量为151.2 m,制桩272.6 m,最大引孔深度22.8 m,最大桩长34 m。

②下部造孔及桩体加密。

振冲器施工的造孔时间、加密时间与深度的关系曲线如图2所示。从图2中可以看出,引孔深度以下的地层仍然非常密实并含有大的漂石,大部分孔段用振冲器造孔异常困难,用装载机施加外力后下沉仍然非常缓慢,个别孔甚至需引孔到设计深度。

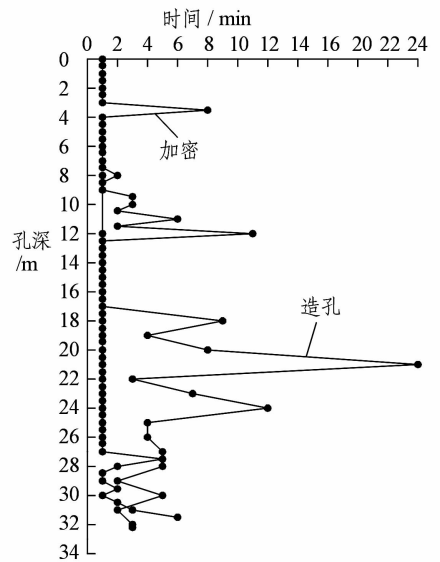
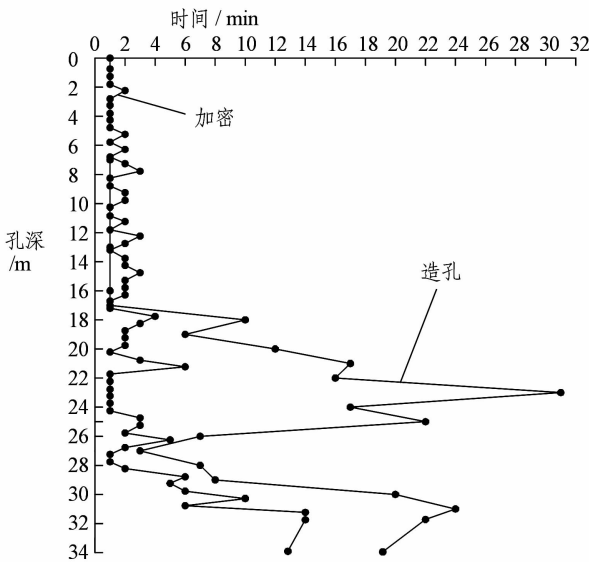


图2 典型的造孔时间及加密时间随加密深度变化分布图

3.9 试验桩质量检测

根据施工的具体情况,由参建各方共同选取3个点位进行静载试验和5孔进行动力触探、3孔

进行标贯原位测试。静载、动力触探及标贯成果见表2、3、4。

表2 静载试验结果汇总表

试验区域	试验类型	压板面积 /m <sup>2</sup>	总沉降量 /mm	最大试验荷载 /kN	压缩模量 /MPa	承载力特征值 /kN
等边三角形 2.2 m	复合	4.2	37.16	1 003	38	534 ≥500
等边三角形 2.5 m	复合	5.52	37.95	768		371 <500
等边三角形 3 m	单桩	1	18.95	1 569	65	≥750

表3 碎石桩动力触探检测成果统计表

孔号	试验深度/m	统计数	范围值	修正后锤击数 $N_{120}$	承载力 $[f_k]$	变形模量	压缩模量	抗剪强度 $\varphi/^\circ$
					/kPa	$E_0/\text{MPa}$	$E_s/\text{MPa}$	
S1-3	0.3~2.9	27	最大值	50	900	64	90.1	38
			最小值	7	570	33.9	47.5	31.5
			平均值	27.91	900	64	90.1	38
			标准值	24.4	900	64	90.1	38
S2-5	0.5~10.7	103	最大值	28.2	900	64	90.1	38
			最小值	12	800	47.4	77.0	33.7
			平均值	18.76	900	64	90.1	38
			标准值	18.16	900	64	90.1	38
S3-1	0.4~9.2	89	最大值	35.42	900	64	90.1	38
			最小值	4	300	25.8	29.8	30.3
			平均值	20.11	900	64	90.1	38
			标准值	18.96	900	64	90.1	38

表4 标贯试验结果汇总表

孔号	层位	孔深/m	地下水位/m	原始击数	VII度地震液化判别地基土标准贯入锤击数临界值 $N_{cr}$			
					近震 $N_0 = 6$	液化判别	远震 $N_0 = 8$	液化判别
SIT-1	③层	8.4	5.3	21	7.3	否	9.7	否
		9.05	5.3	12	7.7	否	10.2	否
	②层	11.69	5.3	13	9.2	否	12.3	否
		13.2	3.5	24	11.2	否	15	否
S2T-1	②层	14.45	3.5	23	12	否	16	否
		15.45	3.5	25	12.6	否	16.8	否
S3T-1	③层	13.15	4.2	25	10.8	否	14.4	否
		13.85	4.2	27	11.2	否	14.9	否

### 3.10 试验结论

(1)动力触探试验及3区单桩竖向抗压静载荷试验结果表明振冲碎石桩的密实度达到密实状态,在桩体的深度范围内均匀性较好,单桩竖向承载力特征值为900 kN, >750 kN,压缩模量 $\geq 65$  MPa,满足设计要求,成桩直径亦能满足设计要求。

(2)通过对1区(2.5 m桩间距)和2区(2.2 m桩间距)进行复合地基的静载荷试验,其结果为2.5 m桩距复合地基承载力为371 kPa < 500 kPa,2.2 m桩距复合地基承载力为534 kPa, > 500 kPa,压缩模量为38 MPa, >35 MPa,满足设计要求。

(3)通过三个区域桩间土的标贯试验,标贯值大于VII度地震液化标准贯入锤击数临界值  $N_{cr}$ ,处理后的地基不液化,满足设计要求。

(4)采用振冲器直接造孔的方法难以贯穿③层,需要采用“冲击钻造引孔后振冲”的方案施工,采取一定措施后造孔深度能达到设计要求。

(5)以上检测结果说明:振冲试验桩施工采用的参数能够满足本工程的需要,可以指导下一

步的施工。

### 4 振冲碎石桩的设计

根据振冲试验成果并结合工程实际,设计单位提出了以下要求:

(1)主厂房、GIS楼区振冲碎石桩以等边三角形布置,设计成桩直径为1 m,桩间距为2.2 m;回车场和厂区挡土墙区振冲碎石桩以正方形布置,桩间距为2.5 m,振冲碎石桩处理深度穿透第③层(砂卵石层)、第②层(粉细砂层)进入第①层(砂卵石层)2 m以上。

(2)设计要求将间距2.2 m布置的桩处理后复合地基的内摩擦角提高到30°以上,压缩模量应大于35 MPa,复合地基承载力>0.5 MPa;桩间距2.5 m正方形布置的桩处理后复合地基承载力>0.35 MPa;②层VII度(烈度)地震不液化。

### 5 振冲碎石桩施工

#### 5.1 施工工艺

根据试验施工成果,采用“冲击钻造引孔后振冲”的施工工艺,振冲器采用ZCQ150型。

#### 5.2 工程施工

由于生产性试验取得了较为理想的效果,正

式施工中仍沿用试验时的振冲施工参数及机械配置形式。

#### (1) 施工场地平整及测量放线。

施工利用挖掘机及装载机对场区地表进行清理及平整,根据现场情况,施工场地按2个平台进行平整,平整高程为1 862.5 m及1 865 m。

场地平整后,由测量人员根据监理工程师提供的控制点进行现场放线,建立现场施工控制网。施工前,用全站仪放出每一根桩的中心点位置,桩位标识采用插小红旗的方式,这样可以避免施工过程中出现漏振、错振、重复振的现象。

#### (2) 造孔。

##### ① 冲击钻机引孔。

本工程高峰期共投入16台CZ-30冲击钻机引孔,引孔施工方法与试验相同。

##### ② 振冲器造孔。

将振冲器缓慢、稳妥地吊起,对准桩位缓慢下降,振冲器至距离地面30 cm以内,启动清水泵供水,待振冲器下端射水口出水的水压、水量达到工艺要求时缓慢下放振冲器至引孔内,待深度超过8 m后,启动振冲器,拉紧防扭绳索,振冲器下至引孔底部后使其贯入土中进行造孔。

造孔过程中,振冲器应始终保持悬垂状态,以保证垂直成孔。当电流值超过电机额定电流时,应减速或暂停振冲器下沉或上提振冲器,待电流值下降后再继续向下造孔。若孔口不返水,应加大供水量并记录造孔时的电流值、造孔速度及返水情况。造孔到达设计深度即可停止,并将振冲器上提30~50 cm。

##### (3) 清孔。

造孔结束后,应进行清孔,一般清孔1~2遍,清孔时间为10 min左右,直至孔口返出泥浆变稀为止。清孔时应将孔口附近的泥块、杂物清除,以免掉入孔内造成堵孔,清孔后将水压和水量减少到维持孔口有一定量的回水,以防止地基土中的细颗粒被大量带走。

##### (4) 填料。

造孔及清孔后即使用30型装载机向孔内填料。为了能顺利地填入振密,填料不宜过猛,每批不宜加填太多,应采取“少吃多餐”的原则。

##### (5) 振密。

依靠振冲器的水平振动力将填入孔中的石料

不断挤向侧壁土层中,同时使填料挤密,直到满足设计要求。加密自孔底开始,逐段向上,振冲器每次上提50 cm,逐段做好振密搭接,以防漏振。

##### (6) 结束。

制桩振密加固至孔口设计标高时,先停止振冲器运转,再停止供水泵。

#### 5.3 质量控制

##### (1) 引孔施工。

孔位偏差:采用全站仪放线确定桩位,待钻机就位后在开孔前再次用全站仪进行校核,确认孔位偏差符合要求后方可开钻施工;

孔深:依据勘探孔钻孔资料,结合冲击钻钻孔渣样确定孔深已穿过③层中的漂石层,确保振冲器能顺利穿透上述地层后在其下部地层内施工;

孔径:施工中控制冲击钻钻头直径不小于80 cm,以此保证引孔孔径不小于80 cm。

##### (2) 振冲施工。

##### ① 造孔。

孔位:振冲器与引孔的孔口偏差不大于100 mm,造孔过程中振冲器应始终保持悬垂状态,成桩后孔位偏差不大于200 mm;

孔深:为保证达到设计深度,可用电焊在振冲器的导管上每隔1 m做一个标记,造孔达到设计深度时,导管上部应超出地面1 m以上。

##### ② 清孔。

清孔水压:0.6~1.2 MPa;

清孔时间:不小于10 min,直至孔口返出泥浆变稀为止。

##### ③ 填料质量控制。

填料以连续下料为主,间隔下料为辅,加料不宜过猛,原则上要“少吃多餐”,填料后必须保证振冲器能贯入到原提起前深度,以防漏振。

##### ④ 加密制桩。

制桩水压为0.1~0.5 MPa、密实电流为140~160 A,达到密实电流后留振10 s,然后将振冲器上提50 cm逐段加密,以保证桩体的加密质量。加密施工过程中的加密电流、留振时间均由振冲施工监控仪控制系统进行控制。施工前,将各标准值输入振冲施工监控仪,当施工参数达到设计要求后,振冲施工监控仪将以响铃的方式给予警示。闹铃放置在吊车驾驶室内,响铃时驾驶员可以迅速作出相应的操作。

#### 5.4 振冲设备改进采取的措施

由于覆盖层深厚,施工时振冲器造孔困难,为提高振冲器的穿透力并延长振冲器的使用寿命,施工中采取了以下措施:

(1)采用两泵串联的形式供水,增大了射水压力和水量,出水口的水压可达到1.4 MPa以上;

(2)在头部加焊垂直耐磨钢板,以增加振冲器对砂层的破坏力;

(3)振冲器导杆中间不用法兰连接,改用焊接方法将其连接为整体一根,并且在导杆外侧加焊钢筋,加重导管的重量以增加垂直外力,加快振冲造孔速度;

(4)振冲器水管使用耐磨的厚壁PE管,使用快速接头,加快拆卸速度;

(5)振冲器体的所有螺丝用 $\phi 10$ 盘圆连接,以防因螺丝退扣造成振冲器掉进孔内的事故发生。在振冲器与导杆连接处增设挂钩,在保证减振效果的前提下提高减振器的抗弯、抗折强度,并且在连接部位螺丝振脱落的情况下可以避免振冲器掉进孔内。

#### 6 振冲碎石桩的质量检测

施工完成后,分别对各部位地基的单桩承载力、变形模量及压缩模量和复合地基的承载力、压

缩模量、抗剪强度及液化等指标进行了检测。一共做了5组复合地基静载试验、8组超重型动力触探试验及8组标准贯入试验。

对照设计要求,各检测指标满足设计及规范要求;同时,按标准贯入试验判定复合地基不液化。桩基工程被评定为“优良”工程。

#### 7 结 语

(1)在复杂的覆盖层地层中施工,采用“冲击钻造引孔后振冲”的施工工艺,解决了漂卵石层振冲成孔问题,可以满足设计及施工要求。

(2)施工中通过对振冲器进行技术改造,增强了振冲器的耐久性及适应性,可以适应复杂地质条件并满足较高的施工技术要求。

(3)本工程使用国产大功率振冲器(ZCQ-150),成功解决了深厚复杂覆盖层振冲施工难题,最大制桩深度达到34 m,实现了振冲施工新的突破,为同类工程提供了借鉴。

#### 参考文献:

[1] 何广讷,编著.振冲碎石桩复合地基[M].北京:人民交通大学出版社,2001.

#### 作者简介:

姚福拴(1976-),男,内蒙古四子王旗人,副经理,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

### 国家水能风能研究中心\国家能源水电工程技术研发中心成立

4月13日,国家能源局依托中国水电工程顾问集团公司(简称“水电顾问集团”)设立的国家水能风能研究中心和国家能源水电工程技术研发中心和国家能源水电工程技术研发中心正式揭牌成立。国家能源局副局长刘琦、中国电力建设集团有限公司党委书记晏志勇等领导出席授牌仪式并讲话。国家水能风能研究中心依托水电顾问集团现有专业力量组建,将充分发挥有关单位和机构的优势,广泛听取各方意见,把水能风能研究中心办成一个开放的研究平台,业务范围涵盖水电风电发展战略、政策研究和技术研发等。目前,该研究中心直属组织机构共包括5个研究所和7个分中心,分别是战略政策研究所、工程技术研究所、水库经济研究所、环境保护研究所、信息技术与管理所,西北分中心、中南分中心、华东分中心、成都分中心、贵阳分中心和昆明分中心。该中心实行主任负责制,设主任1名,副主任若干名。主任由水电顾问集团主要领导担任,负责研究中心的全面工作。同时,该中心工作接受国家能源主管部门的指导,受政府或企业委托,承担相应的研究任务,为国家有关部门、相关企业的水能、风能、潮汐能开发和水电风电持续健康发展提供政策咨询和技术支持服务。目前,该中心制定了2012年至2015年三年工作计划和2012年工作重点,重大课题涵盖水电风电有序开发研究、水电开发促进地方经济社会发展研究、水电建设管理体制机制研究、农村移民安置方式研究、水电开发与生态环境保护关系研究、电力市场及电价形成机制研究等。国家能源水电工程技术研发中心是经水电顾问集团申请,国家能源局开2011年9月批准成立的。该中心的定位是创建一流的水电工程技术创新平台,增强行业自主创新能力;通过工程关键共性技术研究,促进产业升级和提高核心竞争力;搭建产业和科研之间的桥梁,推广应用先进技术;加强对外技术交流与合作,打造具有国际影响力的对外窗口,创立中国水电技术品牌。为此,该中心将参与制定水电科技发展战略与规划,承担国家和行业水电工程重点科研任务和重大课题研究,组织开展新材料新技术的开发研制、检验检测和推广应用,提供水电重大工程技术、标准的评价与咨询服务,开展国际水电开发技术交流与合作等。“两个中心业务既相互独立又有机联系,涵盖了行业发展战略、政策法规、体制机制、工程技术等方面,形成了水能风能完整的研发体系”。两中心在水电顾问集团的成功组建,将使该集团能够将原有相对分散的人才、技术和信息优势进行整合,通过创新内部体制机制,进一步为政府、企业、社会提供优质服务,促进我国水电风电及其他清洁能源的健康发展。从今年起到“十二五”末,水电顾问集团将每年为两中心建设提供1亿元建设经费。