

# 石板水水电站引水隧洞洞轴线方案优选

董文斌

(重庆涪陵水资源开发有限责任公司石板水电厂, 重庆涪陵, 408000)

**摘要** 遵循初设时洞轴线少走泥岩、多穿砂岩的原则, 经详细勘探后查清了初设时推荐洞轴线的围岩地质状况。通过认真分析研究, 在不改变枢纽布置的情况下, 进行方案比较, 最终确定将洞轴线内移, 最大处内移为 500 m, 从而达到了多走砂岩、少穿泥岩的目的。沟谷处的覆盖层亦增厚, 同时减少了洞挖长度, 节省了永久衬砌及临时支护工作量, 节省工期 6 个月, 确保了首台机组提前 76 d 发电。经过两年左右的试运行, 压力引水隧洞运行情况良好, 证明优选的洞轴线方案是科学、合理的。

**关键词** 石板水电站 引水隧洞洞轴线 方案优选

## 1 工程概况

涪陵石板水电站位于丰都县龙河镇, 在龙河下游江池至南江渡河段内, 大坝和厂房分别距丰都县城 55 km 和 45 km。电站为混合式开发, 由大坝枢纽、引水系统和厂区等三大主体工程组成。枢纽中大坝最大坝高为 84 m, 坝顶长度 448 m, 坝顶高程 482 m, 为碾压混凝土重力坝。引水系统工程由深式进水口、压力引水隧洞、双室式调压井、埋藏式压力管道等组成。进水口孔口尺寸 4.6 m × 4.6 m, 底板高程 440 m, 压力隧洞长度 6 045.5 m, 内径 4.6 m, 比降为 3.7‰。调压井上室容积 5 970 m<sup>3</sup>, 墙顶高程 493 m, 竖井高度 67 m, 下室中心高程 433.65 m, 长度 50 m, 压力管道主管长度 348.95 m, 内径 3.7 m, 出口中心高程 420 m 和 251.8 m, 倾角 46°; 3 个岔管 4 条支管总长 189.76 m。厂区工程由主厂房、安装间、副厂房、升压站、综合楼和永久交通工程等 6 大部分组成, 成“一”字型沿河右岸布置, 厂房安装 3 台 3.5 万 kW 及 1 台 1 万 kW 水轮发电机组, 总装机容量 11.5 万 kW。电站机组引用流量 64.2 m<sup>3</sup>/s, 洞内平均流速 3.86 m/s, 单位长度沿程水头损失为 2.4 × 10<sup>-3</sup> m。

## 2 引水隧洞地质概况

隧洞深埋于右岸山体内, 沿线山岭高程 600~830 m, 地貌情况有刘家沟、石板水沟等 4 条冲沟, 相对高差 100~300 m 不等, 隧洞埋深一般为 50~150 m, 最大埋深 400 m, 最浅在石板水沟处, 约 12 m, 临河水平埋深 150 m 左右。

隧洞穿过地层为侏罗系中统上沙溪庙组 J<sub>2s</sub><sup>10</sup>~

J<sub>2s</sub><sup>11</sup>层长石石英砂岩、砂质泥岩不等厚互层, 砂岩厚度一般为 10~40 m, 泥岩厚度为 20~65 m, 两类岩石工程地质特征虽有明显差异, 但同埋于地下深处, 岩石新鲜, 整体性强, 有较好的成洞条件, 唯泥岩开挖后, 易风化崩解。

隧洞横穿石柱向斜之南起端, 由进口的南东翼, 在刘家沟附近通过向斜轴部转至出口的北西翼。地层产状由隧洞进口 N 60°~80°E, NW 8°~10°; 逐渐偏转到刘家沟附近通过向斜轴部, 到石板水沟后转至 N 20°~30°E, SE, 25°~30°; 显示了西陡东缓的不对称向斜构造, 区内无大断层通过。砂岩内主要分布 2 组裂隙: (1) 走向 N 40°~60°E, 倾向 SE (NW), 倾角 75°~80°; (2) 走向 N 20°~70°W, 倾向 NE (SW), 倾角 68°~88°。第(1)组裂隙相对发育, 延伸较长, 达数 10 m, 第(2)组裂隙发育稀疏, 延伸不长, 少于 5 m, 裂隙间距一般 3~5 m 以上, 与层面交切岩体块度较大, 故围岩整体性较好, 但当隧洞轴向与某组裂隙夹角较小或顶拱与层面近于平行时, 仍会出现不稳定掉块, 特别是石板水沟过沟段, 上覆岩体厚度仅 10 余 m 左右, 围岩稳定性较差。

构造平缓的砂、泥岩互层中, 因补给条件差, 排泄条件好, 故一般地下水含量不丰, 但在石柱向斜 NE 翼地段, 岩层倾角较大的单面山体, 仍存在砂岩裂隙水。

## 3 初设洞轴线方案

初设时选用的引水隧洞洞轴线方案为靠外线走向, 即 ABDEF 方案(详见石板水电站引水隧洞平面布置图)(I 方案), 在坝址上游 450 m (A) 处建竖井进水口, 在南江渡龙河右岸半坡一陡壁下 (E) 处设双室差动式调压井, 由一条内径为 4.6 m 隧洞连

接,在刘家沟(B)处和石板水沟(D)处设转折点,折线总长度6 070.2 m,后接埋藏式钢衬压力管道,在1号岔管(F)处分岔供水发电。该轴线方案为使压力隧洞多穿越砂岩,少走泥岩,也为缩短施工支洞长度,平面上尽可能靠近山坡面,隧洞纵坡采用变坡,穿越侏罗系中统上沙溪庙组砂岩与泥岩不等厚互层。根据地质工作推测,初设时,压力隧洞穿越砂岩段总长为3 220 m,占压力隧洞总长的53.05%;泥岩段总长度为2 850.3 m,为总长度的46.95%。隧洞首尾两端埋深为25~80 m,其余段在80 m以上,最大处埋深400 m,最小埋深在石板水沟处为12 m。砂岩层厚一般15~40 m,属II类围岩,泥岩厚度一般40~65 m,为III类围岩。洞内裂隙发育有两组,裂隙间距一般3~5 m,围岩一般整体性尚好。

初设阶段未进行地质钻探,只做了地表地质工作,技设阶段为了进一步查明初设洞轴线的地质情况,对初设选用的洞轴线补做了1/5000平面地质测绘7.1 km<sup>2</sup>,1/5000地质剖面6条共8 200 m,在轴线ABDE段钻孔6个,进尺1 169.7 m,并做了压水试验等地勘工作。勘测结果表明,压力隧洞轴线穿越的砂岩、泥岩层长度与推测情况出入较大。初设时,实际穿越的砂岩段总长1 169.7 m,占总长度的18.6%,当轴线通过石板水沟时覆盖岩体为12 m,仅为洞径的2倍,岩体过薄,岩体裂隙发育,裂隙密度最大可达0.5~1.0 m,形成密集带,稳定性差,加之石板水沟常年有流水,尤其是雨季,由于高倾角裂隙切割,施工渗水亦较大。实际上由于穿越的泥岩长达隧洞总长的81.4%,将增大洞挖工程量,增加衬砌和临时支护工程投入,加之隧洞施工工期是决定电站首台机组发电的控制时间,过多的穿越泥岩,对能否按时发电产生不利影响,因此必需对洞轴线方案进行优化。

## 4 隧洞轴线方案优选

### 4.1 洞轴线优选原则

为节省投资、缩短工期,在不改变工程总体布局,不影响工期及发电运行要求的情况下,洞轴线必需进行优选,优选原则为:(1)遵循初设时多走砂岩、少穿泥岩的原则,以期获得更为稳定的围岩;(2)进水口(A)处、调压井(E)处位置保持不变;(3)引水系统总水头损失基本不变;(4)尽可能减少洞挖工程量,减少衬砌和临时支护工作;(5)综合研究引水系统工期与电站首台机组发电工期的协调关系;(6)慎重处理压力隧洞过石板水沟的问题。

### 4.2 洞轴线方案优选分析

#### 4.2.1 轴线内移

按照上述优选原则分析,洞轴线只能内移,内移最大距离为500 m,在新洞线上布置两个钻孔共470 m,结合原洞线上6个钻孔资料及地表地质测绘组成的6条地质横剖面进行推测,发现在隧洞轴线相应的高程上,轴线内移可穿越比初设轴线方案更多的砂岩J<sub>2s</sub><sup>21</sup>。为使洞轴线与岩层走向交角较大,以利于隧洞开挖时保持隧洞围岩稳定,将第二个折点设置在D点,因此组成了二个新的方案ABD'EF方案(II方案)。

#### 4.2.2 轴线方案比较

##### (1) I方案(ABDEF):

0~400 m进口段,隧洞埋深20~70 m,岩性为J<sub>19</sub><sup>19</sup>层厚层状长石石英砂岩,有两组裂隙发育:(1)N45°~55°E,倾SE,85°;(2)N25°~35°W,倾NE,80°~85°两组裂隙常交切岩体,多沿NE组裂隙面卸荷松动,向SE倾倒,岩体风化卸荷深10~15 m,加之进口段边坡高约40 m,自然坡角达70°,岸坡内边坡稳定性较差,其余段岩体坚硬完整,洞轴线与裂隙交角较大,稳定性好,具有良好的成洞条件,该时K<sub>0</sub>=20 MPa/cm, f<sub>k</sub>=3。

400~420 m段,隧洞埋深70~400 m,岩性为J<sub>18</sub><sup>18-20</sup>层的砂质泥岩夹薄层粘土岩与砂岩,岩石新鲜完整,构造裂隙不发育,一般短少、闭合,该段岩性软弱易风化崩解,必须采取支护并及时衬砌。该时K<sub>0</sub>=10~15 MPa/cm, f<sub>k</sub>=3~4。

420~6 070.3 m段,由于该段由向斜轴部至北西翼,岩层倾角逐渐变陡,因此隧洞通过此段时,穿越了J<sub>2s</sub><sup>17</sup>~J<sub>2s</sub><sup>10</sup>等砂岩、砂质泥岩层。隧洞埋深10~200 m,其中石板水沟上覆厚度仅10 m左右,主要发育的裂隙有(1)N60°~70°E,倾SW,75°~85°;裂面平直光滑,延伸较长,发育间距最小为0.5~1 m;(2)N45°~50°W,倾SE,70°~80°;裂面平直光滑,延伸长,微张开,与洞轴线夹角较小,其中砂岩、砂质泥岩的工程地质条件同前。隧洞通过石板水沟附近岩体风化卸荷明显,稳定性差,过沟段f<sub>k</sub><2,其余段砂岩K<sub>0</sub>=40~60 MPa/cm, f<sub>k</sub>=4~5,砂质泥岩K<sub>0</sub>=8~12 MPa/cm, f<sub>k</sub>=2~3。出口段风化卸荷深约20~25 m,应加强支护。

4200~6 070.3 m段,由于该段由向斜轴部至北西翼,岩层倾角逐渐变陡,因此隧洞通过此段时,穿越了J<sub>2s</sub><sup>17</sup>~J<sub>2s</sub><sup>10</sup>等砂岩、砂质泥岩层。隧洞埋深10~200 m,其中石板水沟上覆厚度仅10 m左右,主要发育的裂隙有(1)N60°~70°E,倾SW,75°~85°;裂面平直光滑,延伸较长,发育间距最小为0.5~1 m;(2)N45°~50°W,倾SE,70°~80°;裂面平直光滑,延伸长,微张开,与洞轴线夹角较小,其中砂岩、砂质泥岩的工程地质条件同前。隧洞通过石板水沟附近岩体风化卸荷明显,稳定性差,过沟段f<sub>k</sub><2,其余段砂岩K<sub>0</sub>=40~60 MPa/cm, f<sub>k</sub>=4~5,砂质泥岩K<sub>0</sub>=8~12 MPa/cm, f<sub>k</sub>=2~3。出口段风化卸荷深约20~25 m,应加强支护。

##### (2) II方案(ABD'EF)方案:

0~115 m进口段,隧洞埋深35~70 m,隧洞穿越的地层为J<sub>2s</sub><sup>19</sup>层厚层块状长石石英砂岩,该段的工程地质条件同I方案进口段。

115~815 m段,隧洞埋深70~100 m,隧洞穿

越的地段为  $J_{2s}^{20}$  层的砂质泥岩夹薄层粘土岩或砂岩, 该段的工程地质条件同 I 方案第二段。

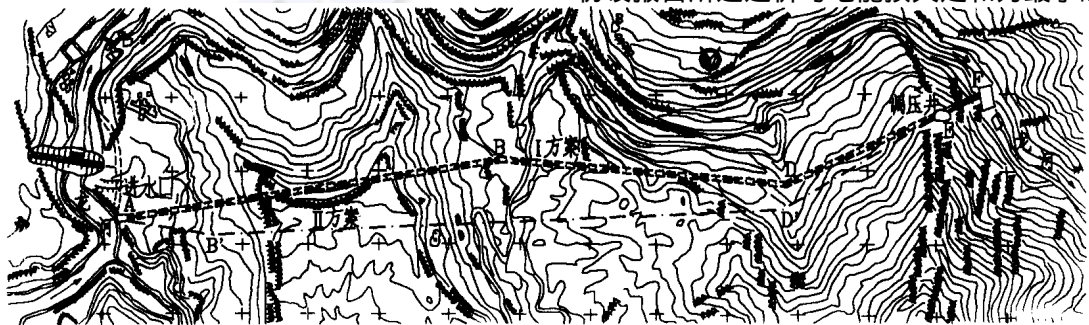
815~ 3 065 m 段, 隧洞埋深较大, 一般都在 100 m 以上, 洞身位于  $J_{2s}^{21}$  层厚层块状长石石英砂岩之上, 主要发育的裂隙 (1)  $N 45^{\circ} \sim 55^{\circ}$  倾 SE,  $75^{\circ} \sim 85^{\circ}$ ; 裂面平直充滑, 延伸较长, 在厚层砂岩中发育间距一般在 5 m 以上, 与洞轴线夹角  $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ; 隧洞通过刘家沟地段, 上覆岩体厚约 80~ 90 m, 局部可能有少量地表水渗入, 该岩石致密坚硬, 完整、稳定性均较好, 具有良好的成洞条件, 该时砂岩  $K_0 = 40 \sim 60 \text{ MPa/cm}$ ,  $f_k = 5 \sim 6$ 。

3 065~ 6 045.5 m 段: 隧洞埋深 20~ 200 m, 隧洞穿越的地层为  $J_{2s}^{20} \sim J_{2s}^{16}$  层砂岩、砂质泥岩等。该段的工程地质条件同 I 方案最后段。第 II 方案通过石板水沟段, 上覆岩体最薄处已达 20 m 深, 基本处于卸荷带以下, 对洞的稳定和地表水渗入有较大改善。

从 I、II 两条引水洞轴线方案穿越围岩情况看, 虽都有成洞条件, 但穿越区不同地质条件有着明显差别, 详见附表:

方案比较表

方案 编号	隧洞		隧洞穿越砂岩段		隧洞穿越泥岩段		石板水沟上 覆岩体厚度 (最薄处) /m	进口 备注 岩石
	长度 /m	占 百分比/%	长度 /m	占 百分比/%	长度 /m	占 百分比/%		
I	6 070.3	11.70	19.3	49.00	80.7	12	砂岩	ABDEF
II	6 045.5	30.20	49.95	3075.5	50.1	20	砂岩	ABDEF



石板水电站引水隧洞平面布置图

选定混凝土衬砌型式。

引水系统为圆形有压隧洞, 内水压力不大, 为  $0.4 \sim 0.7 \text{ MPa}$ , 隧洞全线除进水口、调压井、石板水沟等段垂直埋深在 80 m 以内外, 其余各段均在 100~ 400 m 左右, 全洞为砂、泥岩不等厚互层, 属 II、III 类围岩, 为厚层状砂岩, 岩层走向与洞轴线夹角较大, 砂岩致密坚硬, 承担内水压力的能力较强, 泥岩新鲜完整, 虽易风化崩解, 施工中适时喷锚支护, 其承载能力亦较强, 地下水活动轻微。施工中采用光面爆破, 开挖成型较好, 起伏差 3~ 13 cm, 据此按限裂和有限元法计算对隧洞衬砌结构进行了优化分段,

附表中显示: I 方案洞轴线比 II 方案洞轴线的长 24.8 m, I 方案通过的砂岩段较短, 仅为总长的 19.3%, 而 II 方案通过的砂岩段较长, 为总长的 49.95%, 其中通过石板水沟地段最薄处为 20 m, 工程地质条件改善较大。实施 II 方案后, 洞轴线总长缩短, 穿越砂岩段长度有所增加, 这样就减少洞挖土方量  $4 609 \text{ m}^3$ , 减少衬砌混凝土浇筑量  $4 926 \text{ m}^3$ , 减少喷锚混凝土量  $1 792 \text{ m}^3$ , 也为优化衬砌结构型式创造了条件。在支洞口的选择上, II 方案洞轴线较 I 方案易于选择, 避免支洞口穿越深厚覆盖层。实施 II 方案洞轴线后其工期、工程量和投资也将大为节约。

#### 4.2.3 确定新轴线方案

经过上述分析比较, 选择与 I 方案走向基本一致的 II 方案洞轴线, 其进水口及调压井位置不变, 不影响其它枢纽布置, 洞轴中线段内移, 最大处为 500 m, 选定的压力隧洞洞轴线全长 6 045.495 m, 紧接进水口闸门段, 在 B 处折转向 SW 266.22.50, 在 D 处折转向 SW 246.45.44.8 至调压井 E 点处, 其布置详见引水隧洞平面布置图。

## 5 隧洞衬砌结构优化

经过洞轴线的优选后, 使隧洞穿越了更多砂岩段, 为隧洞衬砌结构的优化创造了条件。根据可研及初设报告所述造价与电能损失之和为最小的原则,

将隧洞结构由单一的钢筋混凝土优化为喷混凝土、素混凝土和钢筋混凝土衬砌 3 种形式:

(1) 800~ 2 800 m 段, 为厚层长石石英砂岩, 埋深 100~ 400 m, 岩层走向与洞轴线夹角较大, 岩石坚硬完整, 裂隙不发育, 地下水活动极轻微, 依据新奥法设计原理, 发挥围岩自承作用, 在保持全洞水头损失与初设一致的情况下, 扩大开挖洞径为 5.9 m, 为降低洞内表面起伏差, 减少糙率和防止岩体局部不稳, 用 0.3 m 厚混凝土护底, 两侧墙下部 1/3, 用喷混凝土再抹平, 上部 1/3, 用厚度 0.1 m 的喷混凝土

(下转第 47 页)

监理工程师在场监督,确保各项试验的真实可靠,万无一失。

在监理工程师对厂房电气安装、调试各个环节的质量监控下,4台机组先后按期并网发电成功。监理人员尽职尽责,真正地把好了工程质量关。1998年2月,经四川省水电厅机电设备安装工程质量监

(上接第40页)

土衬护。

(2)0~10m和6 029.5~6 039.5m段,分别为进口段与调压井渐变段,均为完整坚硬砂岩,埋深分别为50~80m;4 442~4 466m段为砂岩,裂隙发育,裂隙与洞轴线交角小,地下水较多;4742.5~4 892.5m段为石板水沟段砂岩,上覆岩体较薄,裂隙发育密集,岩体稳定性差,地表水下渗量大。以上各段为确保围岩和初砌结构的稳定与安全,也为施工便利,采用单层钢筋混凝土衬砌,过石板水沟段,为保证洞挖安全,采取先从地表进行固结灌浆后再洞挖的办法。

(3)10~800m、2800~4442m、4466~4742.5m和4 892.5~6 029.5m段,各段均为砂、泥岩不等厚互层,砂岩段长30~550m,泥岩段长70~530m,还有上半圆为砂岩、下半圆为泥岩和上半圆为泥岩、下半圆为砂岩,虽然它们承载力都较强,上覆岩体也较大,地下水活动又较少,但由于砂、泥岩段交替频繁,过渡带较软弱,围岩稳定性差。为保证稳定,减小糙率,采用素混凝土衬砌,衬砌厚度为:全砂岩段为0.25m,全泥岩段为0.40m,上砂下泥段为0.30m,上泥下砂段为0.35m,全部取消钢筋。

素混凝土和喷混凝土衬砌按限裂和有限元法计算,利用围岩与衬砌混凝土共同作用,限制裂缝宽度计算结果,泥岩段最大裂缝宽度为0.387mm,满足有关规范对水工混凝土裂缝宽度应小于0.4mm的要求。砂岩段喷混凝土0.1m厚,其最大裂缝宽度仅0.035mm,完全满足规范要求。

督检测中心站初步评定结果,认为全厂电气设备安装工程共7个分部工程中,全部被评为质量优良,且大部分设备经两年多的试运行考验,证明效果良好。

作者简介

夏勇男 重庆涪陵水资源开发有限责任公司石板水电厂检修分场副主任 助理工程师

(收稿日期:1998-12-28)

## 6 结 语

优选后的II方案,达到了轴线多走砂岩,少穿泥岩的目的。洞轴线内移最大为500m,隧洞纵坡由变坡改为均匀底坡,调整了1号及2号支洞口位置,使新洞线穿越的砂岩层由1170m增至3020m,泥岩段为4900m减至3075.5m,尤以过石板水沟上覆岩体厚由12m增至20m,洞线的围岩状况更趋稳定可靠,支洞口也避开了深厚覆盖层,从而减小了洞挖、永久衬砌和临时支护工程量。由于洞轴线的优化,围岩地质状况改良较大,使得设计上能充分考虑了围岩的自承作用,改单一的钢筋混凝土衬砌形式变为喷混凝土、素混凝土和钢筋混凝土3种衬砌结构形式。喷混凝土及素混凝土衬砌采用有限元法计算,按围岩与衬砌混凝土共同作用理论,限制开裂宽度,取消了钢筋,减薄了衬砌厚度,保证了结构的稳定,这不仅大大节省了工程量,而且简化了施工方法,加快了施工进度,提前了工期半年以上,确保了石板水电站工程首台机组提前76d发电。新洞轴线方案节省了混凝土浇筑量 $21\,594\text{ m}^3$ ,钢筋2089t,锚杆21565根,固结灌浆6283m,回填灌浆14160 $\text{ m}^2$ ,节约投资近两千万元。引水隧洞经过两年运行后检查,隧洞衬砌结构稳定,集石坑无石渣沉积,运行良好,说明洞轴线方案优选是科学、合理的。

作者简介

董文斌男 重庆涪陵水资源开发有限责任公司石板水电厂水库管理所所长 助理工程师

(收稿日期:1998-12-31)

## 省学会青工委与四川省清源工程咨询有限公司联合举办青工委1998年会

1999年1月31日,省学会青年工作委员会与四川省清源工程咨询有限公司在成都联合举办年会。出席会议的有来自四川省有关厅局、二滩水电开发公司、学会领导和青工委在蓉的委员60余人。省学会青工委主任委员艾明建主持会议并致辞,欢迎各位专家、领导在百忙之中到会指导。清源公司曾文其总经理也在会上讲话,欢迎大家的光临指导。接着,青工委委员、四川省电力调度局张小平总工向与会代表介绍了四川省1999年启动模拟电力市场的实施情况,使大家对四川省的电力市场情况有了进一步了解。到会的领导同志、原四川副省长、四川省投资公司董事长马麟、原四川省电力局局长、省水电学会名誉理事长王尊相、四川省计委廖杰副主任、四川省建委郑勇副主任、四

川省水电学会副理事长兼秘书长樊天龙、四川省移民办艾宪芳副主任等先后在年会上发表了热情洋溢的讲话,语重心长地对到会的青年水电工作者提出了殷切地希望和有益的建议,谈到了对水电开发的感情以及对建立全国电力大市场,进而加快四川省水电资源的开发和四川省电力市场的现状,都把希望寄托在在座的青年水电工作者肩上。

到会领导和水电老前辈语重心长的话语和对青工委成立一年多时间所开展工作的肯定,激励着省学会青工委的委员们,在今后的工作中将更加努力,为振兴四川省水电事业的发展竭尽全力。

会议在完成各项议程后圆满结束。与会代表对青工委和清源公司为此次会议所做的努力表示衷心地感谢。本刊记者 李燕辉