

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.033

# 三河口碾压混凝土拱坝河谷段建基面优化研究

王 栋<sup>1</sup>, 赵 玮<sup>1</sup>, 张建华<sup>1</sup>, 蒋 锐<sup>1</sup>, 董 鹏<sup>2</sup>

(1. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001;

2. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710010)

**摘 要:** 三河口碾压混凝土拱坝初步设计坝高 145 m, 其突出特点为河谷较宽, 坝体方量大。在开挖施工过程中, 经过地质系统勘察和分析, 河谷段建基面高程可以由初步设计的 501 m 抬高至 504.5 m; 在水工结构设计方面, 参考地质结论优化调整了拱坝体形, 同时完成了坝体应力、应变、拱端推力、基岩参数敏感性等分析复核工作。经分析, 将三河口拱坝河谷段建基面优化后, 其对坝体应力影响不大, 且坝肩稳定条件更为有利, 同时节省投资, 缩短工期, 具有显著的经济、社会效益。

**关键词:** 碾压混凝土; 拱坝; 建基面; 优化; 投资

中图分类号: TV642.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)02-0173-05

## Valley Foundation Surface Optimization of the Sanhekou RCC Arch Dam

WANG Dong<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, ZHANG Jianhua<sup>1</sup>, JIANG Rui<sup>1</sup>, DONG Peng<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China;

2. Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xian, Shaanxi 710010, China)

**Abstract:** The Sanhekou RCC arch dam is 145 m in the preliminary design stage, which is characterized by the wide valley and large volume. In the excavation process, through the investigation and analysis of geological system, valley foundation surface could up to 504.5m from 501m of the preliminary design. In the hydraulic structure design, the shape of arch dam was adjusted considering geological conclusion, this paper completed the dam stress, strain, arch thrust, parameter sensitivity analysis review work and so on. After analysis, the optimization of the foundation surface of the Sanhekou RCC arch dam has little effect on the stress of the dam, and the stability condition is more favorable, while saving investment and shortening the construction period, which has significant economic and social benefits.

**Keywords:** RCC; arch dam; foundation surface; optimization; investment

陕西省引汉济渭工程是省内重大的跨流域调水工程, 由黄金峡水利枢纽、三河口水利枢纽和秦岭输水洞组成。三河口水利枢纽位于陕西省佛坪县与宁陕县交界、汉江一级支流子午河中游峡谷段, 坝址位于大河坝镇三河口村下游约 2 km 处, 主要由拦河大坝、泄洪放空系统、供水系统和连接洞等组成。三河口水库总库容 7.1 亿 m<sup>3</sup>, 碾压混凝土抛物线拱坝初设阶段坝高 145 m, 碾压混凝土方量 100.3 万 m<sup>3</sup>, 为世界第二高碾压混凝土拱坝, 其突出特点是坝顶弧长 472.153 m, 河谷宽度达 405 m, 是目前世界上已建和在建碾压混凝土拱坝中坝顶弧长最长的一座高拱坝。

拱坝建基面优化不仅能有效地减少大坝混凝土

方量, 同时能缩短施工工期, 节省工程造价, 这对坝高、坝宽、水推力和坝体碾压混凝土方量均排在世界前列的三河口碾压混凝土拱坝更具有特殊意义。

## 1 地质勘查

三河口拱坝建基面地层岩性主要为变质砂岩、结晶灰岩、大理岩, 局部发育有石英岩、伟晶岩等各类岩脉。初设阶段大坝建基面底部高程为 501 m, 大坝坝高 145 m。大坝在 2016 年 4 月中旬开挖至 515 m, 根据现场施工情况, 左、右两坝肩已经开挖到位, 河床坝基的地质条件好于前期的预测, 进行大坝河谷段建基面优化研究是切实可行的。

收稿日期: 2017-11-12

修稿日期: 2017-12-09

基金项目: 陕西省水利科技项目 (2015slkj-16)

作者简介: 王 栋 (1974—), 男, 陕西澄城人, 高级工程师, 主要从事水工结构设计工作。E-mail: wangdong9306@126.com

三河口坝基岩体建基面选择标准如表 1 所示,由表可知建基面应以 A<sub>II</sub> 类岩体为主,允许局部的为 A<sub>III1</sub> 类,但需要固结灌浆处理, A<sub>III2</sub> 及以下类别的岩体不能利用,需置换挖除处理。

表 1 三河口坝基岩体建基面选择标准

声波纵波速度 $V_p/(m \cdot s^{-1})$	完整性系数 $K_v$	岩体变形模量 $E_0/GPa$	岩体弹性模量 $E_c/GPa$	坝基岩体选择
$\geq 4300$	$\geq 0.65 \sim 0.70$	$\geq 15.0$	$\geq 22$	A <sub>II</sub> 类坝基岩体,可直接作为坝基岩体,但对局部影响稳定的不利结构面组合需要处理。
3800 ~ 4300	0.60 ~ 0.70	$\geq 10.0$	$\geq 18$	A <sub>III1</sub> 类岩体,可作为坝基岩体,但需加密加强固结灌浆处理。同时对局部影响稳定的不利结构面组合需要处理。
3200 ~ 3800	0.40 ~ 0.60	$\geq 6.5$	$\geq 12$	A <sub>III2</sub> 类坝基岩体,可作为坝肩顶部可利用岩体,但需加密加强固结灌浆处理。同时对局部影响稳定的不利结构面组合需要处理。
$< 3200$	$< 0.40$	$< 5.0 \sim 2.5$	$< 12$	A <sub>III2</sub> ~ B <sub>IV2</sub> 类坝基岩体,不宜作为坝基,应予以清除并置换混凝土。

地质勘查工作采用编录、钻探、孔内波速测试、孔内电视、电磁波跨孔 CT、跨孔波速等勘探手段综合完成<sup>[1-2]</sup>,河谷段坝基 11 个钻孔平面位置如图 1 所示。

有效性,此次要求建基面波速达到 3 400 m/s 即可<sup>[3-4]</sup>。经过系统分析,各项指标显示河谷段建基面可优化至 504 m 高程附近,根据图 3 和图 4,在剔除断层区域的坝基岩体中,各波速岩体面积百分比见表 2,由表 2 可知 504.5 m 高程坝基岩体  $V_p > 3 400$  m/s 的区域占比约为底部建基面的 81.5%,满足底部建基面 80% 达到  $V_p > 3 400$  m/s 的要求,为相对较好的建基面高程。

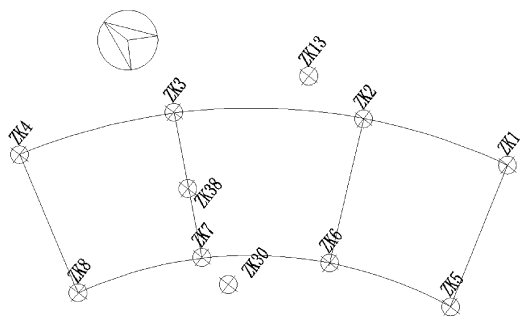


图 1 河谷段坝基钻孔平面位置图

河床开挖至 505.5 m 附近时,河床补充进行了 15 组(H1—H15)跨孔波速测试,图 2 为 H9—H11 跨孔波速与高程曲线图,其曲线和孔内波速测试结果相似,由图 2 可知:各测线上部均存在低波速区,分析为爆破松动带,大部分测线下部波速值高且稳定,表明坝基下部岩体完整性较好;部分测线下部波速值低于 4 000 m/s,分析认为该类测试附近发育有断层,受其影响下部岩体完整性较差。

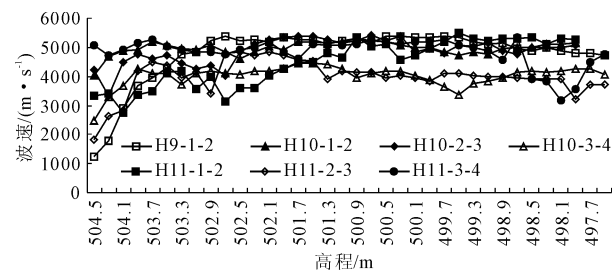


图 2 H9—H11 跨孔波速与高程曲线图

根据坝基岩体声波波速与变形模量成果,要求底部建基面变形模量为 15 GPa,其对应的纵波波速  $V_p \geq 4 300$  m/s,考虑到固结灌浆可提高岩体质量的

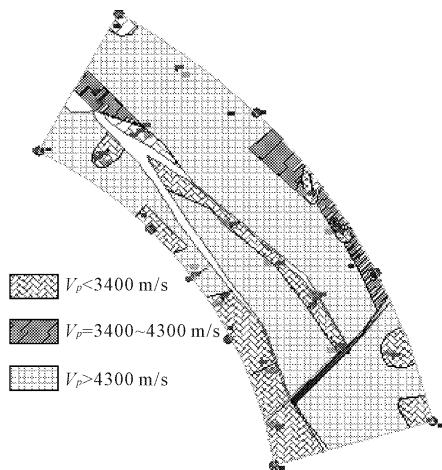


图 3 504.5 m 高程坝基岩体波速分区图

综合上述条件,当建基高程选择 504.5 m 高程时,建基面以下岩体整体较完整,以厚层状结构为主;坝基岩体  $V_p > 3 400$  m/s 的区域占比约为底部建基面的 81.5%,岩体透水率  $< 5$  Lu,钻孔岩石质量指标 RQD 在 56% ~ 83%,岩体大部分为 A<sub>II</sub> 类,且大部分位于目前开挖爆破影响范围以外,最终建议建基面高程选择在 504.5 m。受爆破松动影响、断层构造及局部裂隙密集发育的影响,504.5 m 高程的建

基岩体表面存在 A<sub>III1</sub>类及以下类别的岩体,尤其是断层构造附近的岩体类别普遍在Ⅳ类及以下,因此大坝浇筑前应对 A<sub>III1</sub>类岩体进行加强固结灌浆处理,对 A<sub>III2</sub>类及以下类别的岩体进行开挖回填混凝土处理,尤其要加强对断层构造的置换处理。

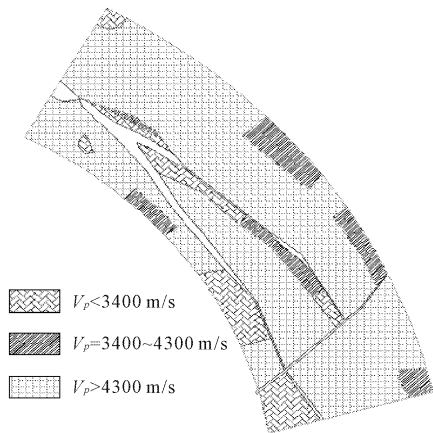


图 4 504.0 m 高程坝基岩体波速分区图

表 2 不同高程坝基岩体波速面积百分比

高程 /m	$V_p \leq 3400$ m/s 岩体面积 百分比/%	$V_p = 3400 \sim 4300$ m/s 岩体 面积百分比/%	$V_p \geq 4300$ m/s 岩体面积 百分比/%
504.5	18.5	9.4	72.1
504.0	9.4	11.1	79.5

## 2 拱坝体形优化

### 2.1 体形分析

三河口拱坝的突出特点是坝高谷宽,坝顶弧长 472.153 m,河谷宽达 405 m。在宽河谷地形条件下修建拱坝,由于悬臂作用的增加与拱作用的削弱同时发生,其梁向拉应力必然增大,从而导致相应部分的主拉应力很容易超过设计允许标准;同时考虑筑坝材料碾压混凝土的施工特点,不能采用较大的倒悬度。

在施工图阶段,鉴于大坝左、右两坝肩已经开挖到位,对整个拱坝体形进行调整的可能性不大(前期已进行过两岸 602 m ~ 646 m 高程的体形收进优化),此阶段仅进行河谷段建基面优化。简单方便的方法是保持大坝各控制高程几何参数不变,把坝底高程从 501.0 m 抬高至 504.5 m,这样三河口拱坝坝高降为 141.5 m。一般拱冠梁剖面如图 5 所示<sup>[5]</sup>,要求上游曲线最凸点  $H_0 = (0.55 \sim 0.80)H$ ,  $A_u = (0.12 \sim 0.20)H$ <sup>[6-7]</sup>。建基面抬高后,三河口拱坝  $H_0 = 0.66H$ ,  $A_u = 0.16H$ ,说明拱冠梁剖面特性是合适的;大坝最大中心角 92.04°,位于 602 m 高程即 0.69H 处(规范推荐 0.4H ~ 0.7H 处,H 为最大坝高),拱效应最大的位置基本为大坝中面形心的高程,说明其体形极大地发挥了拱的作用。大坝部分控制高程几何参数见表 3,大坝三维体形见图 6。

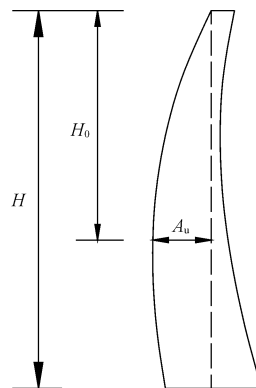


图 5 拱冠梁剖面图

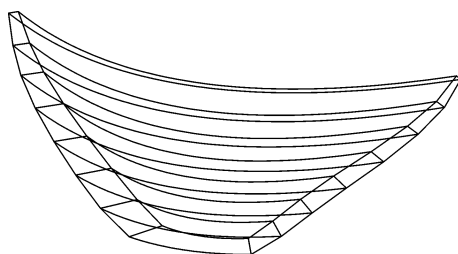


图 6 大坝三维体形图

表 3 大坝部分控制高程几何参数

高程 /m	拱冠处厚度/m	拱端厚度/m		拱冠处曲率半径/m		半中心角/(°)		弧 长/m	
		左岸	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸	上游	上游
646.0	9.000	9.000	9.000	204.209	201.943	45.42	44.46	472.153	458.035
623.0	15.172	15.311	15.625	190.204	178.769	45.78	46.00	452.297	427.879
602.0	20.197	20.982	21.241	175.031	159.995	46.05	45.99	418.297	385.500
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
521.0	34.570	37.457	37.091	114.401	107.402	34.49	31.88	175.765	134.822
504.5	36.604	38.915	38.831	105.187	100.269	25.30	24.18	114.131	81.931
501.0	37.000	39.110	39.123	103.500	98.902	22.84	22.22	100.976	71.331

2.2 坝体应力及拱端推力变化

经拱梁分载法复核,拱坝建基面优化前、后各工

况的最大变位及最大拉压应力对比见表 4,坝体应力满足规范要求<sup>[8-11]</sup>。

表 4 拱坝坝体位移及应力最大值对比表

计算工况	拱冠梁最大径向位移/cm		最大主压应力/MPa		最大主拉应力/MPa		拉、压应力控制标准/MPa
	原形体	优化后	原形体	优化后	原形体	优化后	
基本荷载组合	7.90	6.76(正常蓄水位 + 温降)	5.60	5.94(正常蓄水位 + 温升)	-1.20	-1.16(设计洪水位 + 温升)	压应力:6.25 拉应力:-1.20
特殊荷载组合(地震)	—	—	7.56	7.58(地震 + 温降)	-2.61	-2.45(地震 + 温升)	压应力:16.39 拉应力:-3.08

注:拱梁分载法正值为压应力,负值为拉应力

在基本荷载正常蓄水位 + 温降工况下坝体的径向位移最大,优化后位移由原 7.90 cm 减小为 6.76 cm,具体见图 7;基本荷载正常蓄水位 + 温升工况为压应力控制工况,最大压应力由 5.60 MPa 增大为 5.94 MPa;基本荷载设计洪水位 + 温升工况为拉应力控制工况,而拉应力由 -1.20 MPa 减小为 -1.16 MPa,优化后在该工况下,上游面主拉应力等值线见图 8,可见其应力分布是比较对称的。特殊荷载工况下,地震 + 温降为压应力控制工况,最大压应力 7.56 MPa 增大为 7.58 MPa,地震 + 温升为拉应力控制工况,拉应力由 -2.61 MPa 减小到 -2.45 MPa,坝体应力变幅均较小,且在规范控制之内。

对于拱端推力,在基本组合正常蓄水位 + 温升下原形体与优化后形体拱端推力及推力角变化见表 5(其它工况结果类似),从表 5 中可以看出,拱端总

推力在形体优化后与原形体成果相比变小,对坝体应力影响不大,且有利于坝肩稳定。

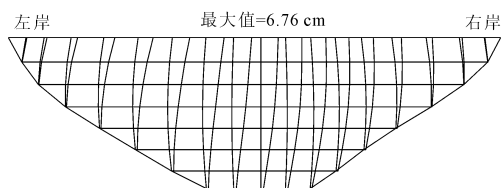


图 7 在正常蓄水位 + 温降工况下径向位移图

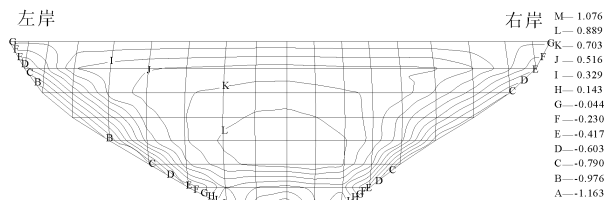


图 8 在设计洪水位 + 温升工况下,上游面主拉应力等值线图(MPa)

表 5 拱坝左右拱端推力及夹角对比表

总推力/万 t				夹角/(°)			
左拱端		右拱端		左拱端		右拱端	
原形体	优化后	原形体	优化后	原形体	优化后	原形体	优化后
111.74	102.11	102.23	93.29	13.72	12.49	19.88	18.50

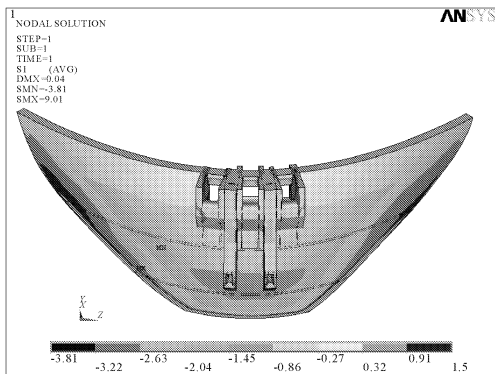
注:表中夹角指合力与拱坝中心线交角。

2.3 坝体有限元应力复核

建基面最终优化后,对坝体进行了有限元应力复核,计算成果分析表明:坝体应力分布合理,满足相应规范的应力控制标准。以下仅列举设计洪水位 + 温升工况下坝体上游面有限元主拉应力云图,见图 9,经过和图 8 对比可知,有限元法和拱梁分载法的应力分布趋势基本一致。拱坝上游面主拉应力大于 1.5 MPa 的区域分布在上游面与地基交接部位,分布范围为高程 504.5 m ~ 584.0 m,但经过应力等效处理后,满足规范要求<sup>[12-14]</sup>。

2.4 基岩参数敏感性分析

为了测试建基面优化后拱坝形体对底部基岩的



备注:有限元法正值为拉应力,负值为压应力。

图 9 在设计洪水位 + 温升工况下,上游面有限元主拉应力云图(MPa)

适应能力,进行了坝基岩体参数敏感性分析<sup>[15]</sup>,把坝基 504.5 m 变形模量从原来的 15 GPa 降低为 12 GPa,同时在坝肩开挖过程中,在右岸 623 m ~ 646 m 高程发现局部破碎带,其影响相应部分基岩质量,因此把此段岩体变形模量从原来的 9 GPa 降低为 5 GPa。敏感性分析只列举组合(1)正常蓄水位 + 温降

和组合(2)正常蓄水位 + 温升两种工况的应力计算结果,由表 6 可知,在敏感分析中,由于大坝内力重新调整,坝体各主应力除上游面主压应力略变大外,其余主应力均呈下降趋势,分析结果充分说明:拱坝体形的设计是比较合理的,其适应坝基岩体变化的能力比较强。

表 6 坝体应力敏感性分析表

单位:MPa

计算 工况	主压应力				主拉应力			
	上游面		下游面		上游面		下游面	
	组合(1)正常 蓄水位 + 温降 下应力	组合(2)正常 蓄水位 + 温升 下应力	组合(1)正常 蓄水位 + 温降 下应力	组合(2)正常 蓄水位 + 温升 下应力	组合(1)正常 蓄水位 + 温降 下应力	组合(2)正常 蓄水位 + 温升 下应力	组合(1)正常 蓄水位 + 温降 下应力	组合(2)正常 蓄水位 + 温升 下应力
原参数	4.43	3.59	5.75	5.94	-0.73	-1.15	-0.49	-0.06
敏感分析	4.47	3.59	5.38	5.59	-0.69	-1.12	-0.45	-0.02

### 3 结 论

(1) 本次河谷段建基面优化研究地质勘查工作采用编录、钻探、孔内波速测试、孔内电视、电磁波跨孔 CT、跨孔波速等勘探手段综合完成;最终根据地质条件系统分析,河谷段建基面高程可选择在 504.5 m。

(2) 经拱梁分载法和有限元法复核,优化后的坝体应力满足规范要求。拱端总推力在体形优化后与原形成果相比变小,对坝体应力影响不大,且坝肩稳定条件更为有利,优化后体形适应坝基岩体变化的能力比较强。

(3) 将拱坝河谷段建基面优化后,坝体高度从 145 m 降低为 141.5 m,坝体碾压混凝土土方量从 100.3 万 m<sup>3</sup> 减少为 99.0 万 m<sup>3</sup>,大坝开挖量从 152.4 万 m<sup>3</sup> 减少为 150.9 万 m<sup>3</sup>,可直接节省投资 510 万元,缩短工期 2 个月,具有显著的经济、社会效益。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程地质勘察规范: GB 50487—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009: 80-82.
- [2] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程施工地质勘察规程: SL 313—2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004: 13-18.
- [3] 王仁坤, 林 鹏. 溪洛渡特高拱坝建基面嵌深优化的分析与评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2011-

- 2018.
- [4] 王毅鸣, 苏 岩, 邓毅国. 天花板水电站拱坝建基面选择及优化调整研究[J]. 水力发电, 2011, 37(6): 9-12.
- [5] 闫超君, 孙林松. 基于应变能与模糊贴近度的拱坝体形稳健优化设计[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 37-40.
- [6] 朱伯芳, 高季章, 陈祖煜, 等. 拱坝设计与研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 156-198.
- [7] 李 瓚, 陈兴华, 郑建波, 等. 混凝土拱坝设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 262-279.
- [8] 中华人民共和国水利部. 混凝土拱坝设计规范: SL 282—2003[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 33-34.
- [9] 中华人民共和国发改委. 混凝土拱坝设计规范: DL/T 5346—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 21-27.
- [10] 中华人民共和国水利部. 碾压混凝土坝设计规范: SL 314—2004[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 5-6.
- [11] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物抗震设计规范: SL 203—97[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 25-26.
- [12] 郭晓晶, 徐瑾瑾. 子模型法在拱坝泄水底孔应力分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(1): 205-212.
- [13] 李守义, 周 伟. 基于 ANSYS 的拱坝等效应力研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(5): 38-41.
- [14] 王 栋, 李守义. 基于 ANSYS 的拱坝体形优化设计[J]. 水利水运工程学报, 2005, 4: 51-55.
- [15] 彭 辉, 张 萍. 乌东德拱坝地基变形模量对上部坝体结构作用效应敏感性分析研究[J]. 固体力学学报, 2014, 35(S1): 195-198.