

邢丁家,邢一豪. 引汉济渭工程三河口水库拱坝坝基岩体质量特征与建基面优化选择[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(6): 806-812.

XING Ding-jia, XING Yi-hao. Quality Characteristics and Optimization Selection of Arch Dam Foundation Rock Mass of Sanhekou Reservoir for Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(6): 806-812.

引汉济渭工程三河口水库拱坝坝基岩体 质量特征与建基面优化选择

邢丁家, 邢一豪

(陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要:研究坝基岩体质量有助于合理选择建基面,为工程设计、施工和安全运行提供科学依据。以引汉济渭工程三河口水库拱坝坝基岩体为研究对象,通过对坝基开挖揭露的岩体重新进行勘探试验,利用勘探孔进行孔内电视、纵波波速及变形模量等测试工作,对坝基岩体风化特征、结构特征、变形模量与纵波波速关系等问题进行综合分析研究,特别是对坝基局部的断层破碎带及碎裂岩体能否利用等问题进行了具体分析,并对坝基岩体质量进行了工程地质分类,选出了符合实际的建基面,使大坝建基面高程由原来的501.0 m抬升至504.5 m,优化了坝基开挖深度,减少了坝基处理难度与混凝土浇筑量,缩短了工期,节约了工程投资。

关键词:拱坝;坝基;岩体质量;勘探试验;建基面;优选;引汉济渭工程

中图分类号:P642;TV223

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2018)06-0806-07

Quality Characteristics and Optimization Selection of Arch Dam Foundation Rock Mass of Sanhekou Reservoir for Hanjiang-to- Weihe River Water Diversion Project, China

XING Ding-jia, XING Yi-hao

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

Abstract: Study on the quality of dam foundation rock mass will help to reasonably select the foundation surface, and provide a scientific basis for engineering design, construction and safe operation. Taking the dam foundation rock mass of Sanhekou reservoir for Hanjiang-to-Weihe river water diversion project as the research object, the rock mass exposed by the dam foundation excavation was re-explored; meanwhile, the weathering characteristics, structural characteristics, relationship between longitudinal wave velocity and deformation modulus of dam foundation rock mass were elaborated comprehensively by using the test of the downhole television, longitudinal wave velocity, deformation modulus with prospecting holes; and the utilization of fault fracture zone and cataclastic rock of the dam foundation was analyzed emphatically, and a detailed engineering geological classification of dam foundation rock mass was discussed. Finally, the practical foundation surface is selected to raise elevation of the dam foundation plane from 501.0

收稿日期:2018-09-25;修回日期:2018-10-24 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

作者简介:邢丁家(1963-),男,山西稷山人,教授级高级工程师, E-mail: 724137810@qq.com。

m to 504.5 m, which optimizes the excavation depth of dam foundation, reduces the difficulty of dam foundation treatment and concrete pouring, and saves construction period and project investment.

Key words: arch dam; dam foundation; rock mass quality; exploration test; foundation plane; optimization; Hanjiang-to-Weihe river water diversion project

0 引言

引汉济渭工程是陕西省重大跨流域调水工程,跨越黄河、长江两大流域,横穿秦岭屏障。整个调水工程由三大部分组成,即黄金峡水利枢纽、三河口水利枢纽和秦岭输水洞。工程在汉江干流黄金峡和支流子午河分别修建水源工程黄金峡水利枢纽和三河口水利枢纽蓄水,经总长 98.3 km 的秦岭隧洞将水送至关中,解决西安、宝鸡、咸阳、渭南等沿渭河大中城市的生活、工业生产用水问题。其中三河口水库是引汉济渭工程重要水源之一,也是整个引汉济渭工程中具有较大水量调节能力的核心项目和调蓄中枢。三河口水库大坝为碾压混凝土拱坝,坝高约为 145 m,总库容为 $7.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。工程初步设计阶段确定的河床建基面高程为 501.0 m^[1],目前大坝已开工建设,两坝肩开挖已结束,当河床坝基开挖至高程 506.0 m 附近时,发现河床坝基的地质条件好于前期预测,为此提出对河床坝基岩体质量进行研究,分析评价建基面抬高的可行性,进一步优化设计,以期能减少坝基开挖量,降低工程造价,同时缩短工期。

有关建基面选择问题,罗荣等已做过大量研究工作^[2-9];为了更准确地评价坝基岩体质量,优选建基面,前人开展了大量已成高拱坝建基面的研究^[10-17]。目前,选择建基面主要以岩体类别为依据,但岩体类别的确定往往指标偏少,有的甚至凭经验,导致划分出的岩体类别往往与实际有差别。很多研究成果主要以坝基岩体的风化程度来确定建基面^[18],特别是对拱坝过分强调了岩体的微新、完整性^[19],对岩体的各种工程特征及综合质量研究不够,致使选出的建基面往往偏深,不仅增加开挖量与工程费用,还拉长工期,给工程建设带来很多困难。尤其是工程前期,受各种条件制约,勘探工作深度有限,不能完全揭露岩体工程地质条件,导致这一问题更加突出。本文通过对引汉济渭工程三河口水库拱坝坝基开挖揭露的岩体重新进行勘探试验,新增加 8 个勘探孔,重点从工程地质角度评价坝基岩体质量与建基面选择的合理性。通过在勘探孔采用孔内

电视、纵波波速及变形模量等测试方法,对坝基岩体风化特征、结构特征、纵波波速与变形模量关系等问题进行综合分析,特别是对坝基局部的断层破碎带及碎裂岩体能否利用等问题进行了分析研究,并对坝基岩体重新进行了岩体质量工程地质分类,以期选出符合实际的建基面,加快工程建设进度,节约工程投资。

1 工程地质概况

三河口水库大坝位于陕西省佛坪县境内汉江一级支流子午河中游峡谷段。由于两坝肩施工开挖已完成,本次研究对象主要是河床建基面的工程地质条件。河床坝基宽约为 68 m,砂卵石覆盖层厚度为 5.0~8.5 m,下伏基岩主要为下志留统梅子垭组(S_1m)变质砂岩(Mss),局部夹有大理岩^[20]。变质砂岩呈浅灰色—灰褐色,矿物组成以长石、石英为主,次为云母及暗色矿物,具变余砂状结构、块状及层状构造。大理岩呈白色—浅灰白色,矿物组成以方解石为主,具粒状变晶结构、块状构造,多呈条带状出露,从左岸到右岸横穿河床,一般宽度为 2 m 左右(图 1)。

坝基部位的地质构造主要为断层与裂隙两种类型。断层主要有 F_{44} 、 F_{45} 两条,大体从河床坝基的中下区域横穿河床,均为逆断层。 F_{44} 产状为 $(220^\circ \sim 240^\circ) \angle (70^\circ \sim 75^\circ)$,断层带宽度为 0.3~1.0 m,主要为灰黑色碎裂岩; F_{45} 产状为 $(240^\circ \sim 250^\circ) \angle (65^\circ \sim 70^\circ)$,断层带宽度为 0.3 m,主要为灰黑色碎裂岩及少量断层泥。裂隙主要发育一组,产状为 $(170^\circ \sim 200^\circ) \angle (60^\circ \sim 70^\circ)$,宽度为 1~3 mm,岩屑充填,延伸长度大于 10 m。断层、裂隙规模不大,且断层横向展布,没有贯通上下游,对坝基影响较小。

高程 506.0 m 坝基岩体以微风化为主,局部受断层影响残存少量强风化与弱风化岩体。经取样测试,各类岩石的主要物理力学指标见表 1。物探测试其强风化岩体的弹性波纵波波速(V_p)为 $1\,000 \sim 2\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,弱风化岩体的纵波波速为 $2\,500 \sim 3\,800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,微风化岩体的纵波波速为 $3\,800 \sim 5\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。坝基岩体整体完整性较好。

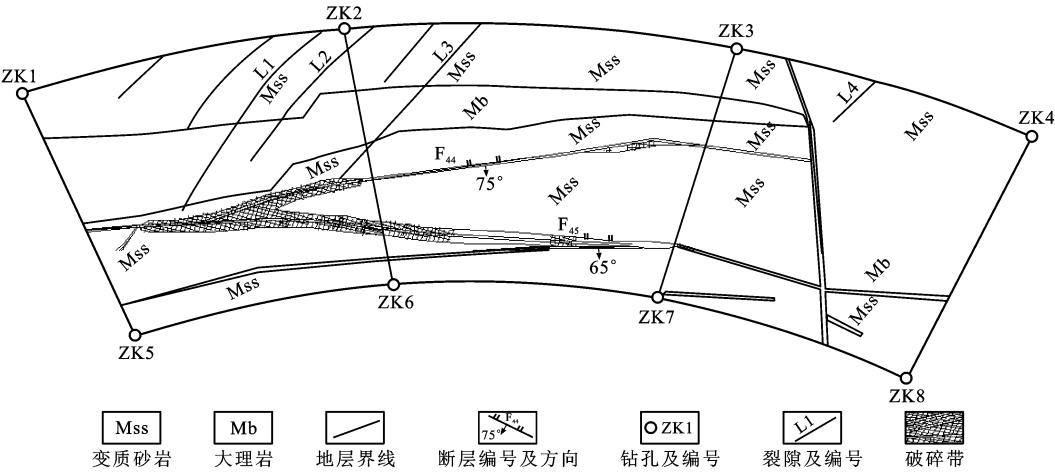


图 1 引汉济渭工程三河口水库坝基高程 506.0 m 岩体工程地质编录图

Fig. 1 Engineering Geological Record Map of Dam Foundation of Sanhekou Reservoir for Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project at the Elevation of 506.0 m

表 1 坝基岩体主要物理力学指标

Tab. 1 Main Physical and Mechanical Indexes of Dam Foundation Rock Mass

岩性	风化程度	干燥密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	干燥抗压强度/ MPa	饱和抗压 强度/MPa	摩擦系数	黏聚力/ MPa	干燥变形 模量/GPa	饱和变形 模量/GPa
变质砂岩	弱风化	2.79	2.80	98	67	0.80	3.10	40	39
	微风化	2.82	2.83	117	108	1.20	4.20	79	53
大理岩	弱风化	2.69	2.70	84	66	0.93	0.69	48	45
	微风化	2.71	2.72	92	71	1.13	0.76	61	52

2 坝基岩体质量特征

根据岩体风化特征,结合设计要求,初步设计阶段建议将建基面置于微风化岩体中,建基面高程 501.0 m,开挖深度 13~15 m。施工过程中,当开挖到高程 506.0 m 附近时(开挖深度 10 m 左右),坝基岩体以弱—微风化为主,大部分岩体纵波波速大于 3 300 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,岩石饱和抗压强度大于 60 MPa,具有优良的地质条件。为此,本文提出对河床坝基岩体质量进行

深入研究,分析建基面抬高可行性,节约工程投资。

2.1 风化特征

工程前期对岩体风化划分偏保守,主要根据肉眼鉴定。《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)对岩体风化带划分也主要考虑岩体纵波波速^[21]。本文依据坝基钻孔资料及孔内纵波波速测试结果,利用纵波波速、岩石质量指标(RQD)及肉眼观察等综合分析判断,对坝基岩体进行了更加合理的风化分带(表 2)。

表 2 坝基岩体风化分带

Tab. 2 Weathering Zonation of Dam Foundation Rock Mass

岩性	风化分带	分布范围	外观地质特征	纵波波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	岩石质量指标/%	备注
变质砂岩	强风化	主要残留在断层裂隙面表部,分布面积极小	岩石大部分变色,裂隙发育,多为碎块状	1 000~2 200	7~30	开挖到高程 506.0 m,强风化岩体基本全部清除
	弱风化上带	多分布在断层裂隙周边,分布范围不大,厚度 1 m 左右	岩石表面大部分变色,断口较新鲜,裂隙较发育,多为次块状	2 300~3 500	30~50	
	弱风化下带	主要分布在坝基左侧下游,厚度 2~3 m	岩石裂隙面大部分变色,裂隙不发育,块状较大	3 600~4 200	50~70	
	微风化	占坝基面积 80%以上	岩石表面及裂隙面轻微褪色,裂隙不发育,岩体基本坚硬完整	4 300~5 500	70~85	高程 504.5 m 以下坝基基本为微新岩体

由表2可知,坝基开挖到高程506.0 m时岩体绝大部分为微风化,受裂隙及断层影响,局部少量岩体为弱风化。测试结果表明,随着开挖深度的增加,岩体风化程度逐渐减弱,若继续向下开挖1 m左右,弱风化上带岩体基本全部挖除,弱风化下带岩体残留范围和厚度变得很小,主要分布在坝基右侧下游边界,且纵波波速较高,对坝基整体影响不大。依据高拱坝建基面选择原则,确定建基面应以微风化-新鲜为主,开挖1 m左右后建基面岩体的风化程度基本满足建基面选择要求。

2.2 结构及完整性

本工程设计要求坝基岩体整体纵波波速一般不小于 $4\,300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。开挖结果表明,高程506.0 m以下坝基岩体以厚层状、块状结构为主,岩体普遍较完整。厚层状及块状结构岩体孔内纵波波速测试显示,岩体纵波波速呈上部低、下部高的规律,高程506.0 m附近岩体纵波波速低于 $4\,300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,但高程504.5 m以下纵波波速均大于 $4\,300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,完整性系数(K_v)普遍大于0.7,可见高程504.5 m以下岩体完全满足设计要求,其代表性钻孔(ZK4)测试结果见图2。

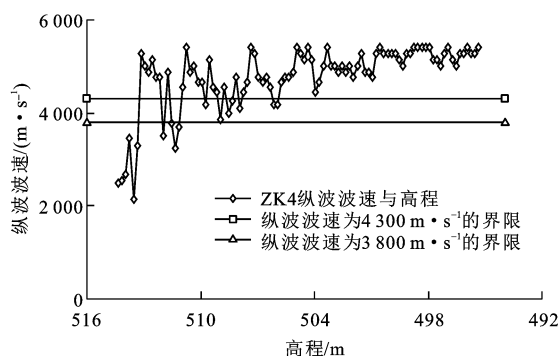


图2 厚层状及块状岩体纵波波速与高程的关系

Fig. 2 Relationship Between Longitudinal Wave Velocity and Elevation of Thick Layer and Massive Rock Mass

坝基局部断层及裂隙发育段为镶嵌结构及碎块状结构岩体^[22],裂隙发育,纵波波速波动较大,特别是高程496.0~498.0 m受断层 F_{45} 影响,岩体纵波波速较低,其代表性钻孔(ZK5)测试结果见图3。局部镶嵌结构及碎块状结构岩体在坝基中所占比例仅为19%,面积不大。分析认为,局部镶嵌结构及碎块状结构岩体裂隙发育,可灌性较好,固结灌浆后其强度会有所提高。根据类似工程的灌浆统计资料^[23],此类岩体固结灌浆后,其纵波波速可提高30%左右,其强度与完整性提高较明显,虽没有达到设计要求(纵波波速 $4\,300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),但由于其所占

比例很小,根据其对应的物理力学指标,经设计分析计算结果满足大坝稳定要求。

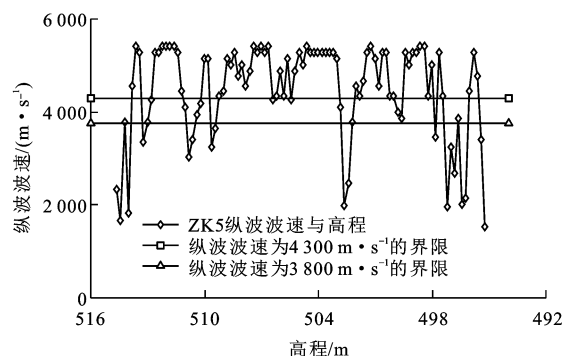


图3 碎块状岩体纵波波速与高程的关系

Fig. 3 Relationship Between Longitudinal Wave Velocity and Elevation of Broken Rock Mass

2.3 强度与变形特征

本次取样测试除少量断层破碎带外,坝基岩石饱和抗压强度均在 $65\sim 108\text{ MPa}$ 之间,大于 60 MPa ,属坚硬岩,岩体强度普遍较高。对于大坝变形分析所需要的关键参数——岩体变形模量^[24],本文根据钻孔内的测试结果及前期勘察时勘探孔内的原位试验,对不同类别岩体测出的变形模量及其对应的纵波波速进行统计分析,建立了岩体变形模量与纵波波速关系(图4)。图4中拟合线判定系数为0.760 4,说明两者相关性较好,拟合出的岩体变形模量(E_0)与纵波波速关系式为 $E_0 = 1.124\,8e^{0.000\,6V_p}$ 。由此可知,岩体纵波波速越高,其变形模量越大,在坝基岩体中只要测出某一高程的纵波波速,就可以求出其对应的岩体变形模量,解决了开挖现场不便测试变形模量的难题,从而较快地提出不同类别岩体的变形模量参数。

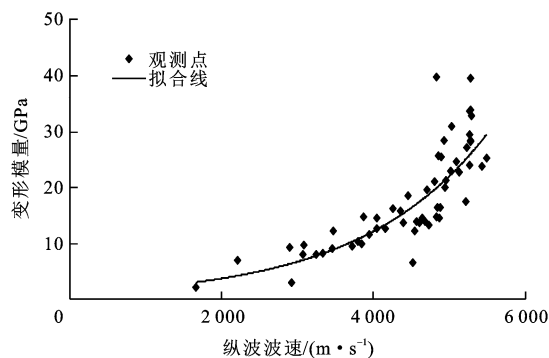


图4 岩体变形模量与纵波波速的关系

Fig. 4 Relationship Between Deformation Modulus and Longitudinal Wave Velocity of Rock Mass

坝基高程504.5 m以下岩体测出的纵波波速普遍在 $3\,000\sim 5\,300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,依据岩体变形模量与

纵波波速的关系式可以得出其对应的变形模量一般为 8~25 GPa,强度较高,可满足大坝变形设计要求。

2.4 质量评价

基于高程 506.0 m 以下坝基岩体的风化特征、

结构及完整性、强度及变形特征等指标,依据《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)^[21],并结合类似工程经验,对高程 506.0 m 以下坝基岩体质量进行工程地质分类(表 3)。

表 3 坝基岩体质量工程地质分类

Tab. 3 Engineering Geology Classification for Dam Foundation Rock Mass Quality

高程	风化程度	饱和抗压强度/MPa	纵波波速/(m·s ⁻¹)	完整性系数	结构类型	岩体分类	占比/%
504.5~506.0 m	强风化		<2 200		碎块状结构,局部镶嵌结构	A _V 类	6.1
	弱风化上带	≥40	2 300~3 500	0.35~0.49	镶嵌、次块状结构	B _{IV} 类	12.1
	弱风化下带	≥60	3 600~4 200	0.50~0.69	块状结构为主,局部次块状结构	A _{III} 类	18.2
	微风化带	≥80	≥4 300	≥0.70	厚层及块状结构	A _{II} 类	63.6
501.0~504.5 m	强风化		<2 200		碎块状结构,局部镶嵌结构	A _V 类	0.0
	弱风化上带	≥40	2 300~3 500	0.35~0.49	镶嵌、次块状结构	B _{IV} 类	3.3
	弱风化下带	≥60	3 600~4 200	0.50~0.69	块状结构为主,局部次块状结构	A _{III} 类	15.7
	微风化带	≥80	≥4 300	≥0.70	厚层及块状结构	A _{II} 类	81.0

由表 3 可以看出,坝基岩体在高程 504.5 m 以下整体质量明显优于在高程 504.5 m 以上的。高程 504.5 m 以下 A_{II}类岩体所占比例大于 80%,基本无强风化岩体,局部 A_{III}类及以下类别的岩体所占比例不大,经处理后可满足坝基设计要求。

3 大坝建基面选择及坝基处理建议

根据现行规范及设计要求,引汉济渭工程三河口水库拱坝建基面选择标准为:建基面应以 A_{II}类岩体为主,纵波波速不低于 4 300 m·s⁻¹;允许局部有 A_{III}类岩体,但需要固结灌浆处理;少量 B_{IV}类岩

体不能利用,需挖除置换处理。依据该标准,高程 504.5 m 以下坝基岩体整体强度高,完整性好。其中,大部分为 A_{II}类岩体,可直接作为建基面;A_{III}类岩体固结灌浆处理后,亦可作为建基面;B_{IV}类岩体所占比例不大,挖除置换处理后,可满足坝基要求。由此可见,选择高程 504.5 m 为建基面较合理(图 5)。

建基面确定后,还应对局部少量不符合要求的岩体进行处理。本工程坝基 A_{II}类岩体是良好的天然地基,不需要进行特殊处理,可以直接作为坝基岩体;局部 A_{III}类岩体受裂隙发育影响,纵波波速稍低,但岩体强度较高,通过固结灌浆可以进一步提高

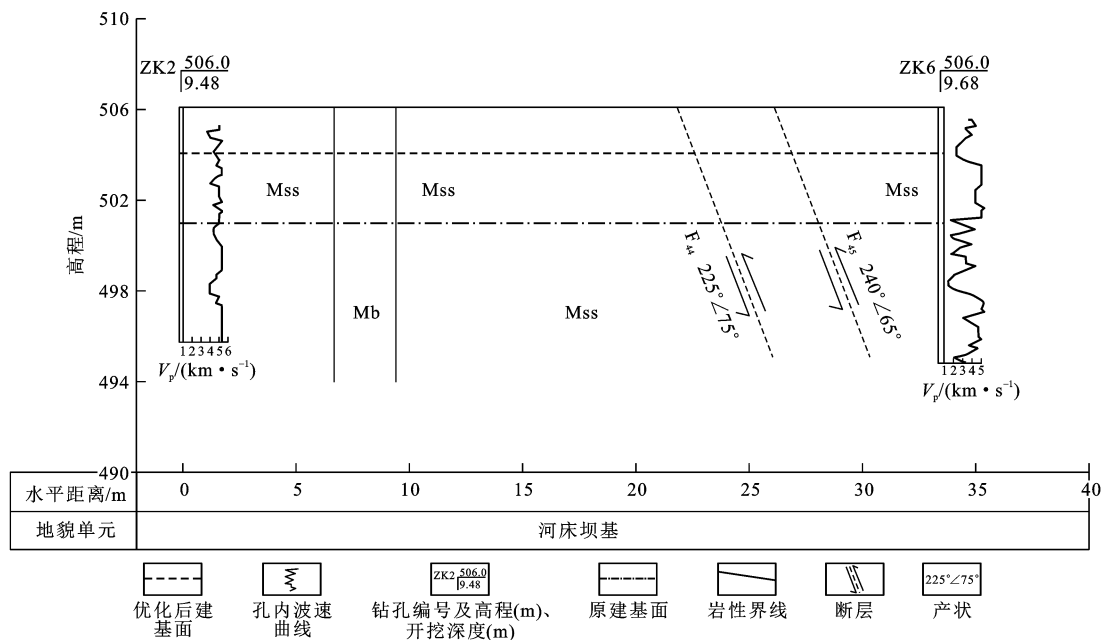


图 5 建基面优化示意图

Fig. 5 Sketch Map for Optimization of Foundation Plane

其强度与完整性,对该类岩体建议进行固结灌浆处理^[25-26];B_{IV}类岩体所占比例很少,主要为构造破碎带,其强度、纵波波速均较低,不能作建基面,必须挖除置换,建议开挖深度应大于其出露宽度,挖除后及时回填混凝土,处理后的地基应进行检测,确保满足设计要求。

4 结 语

通过对引汉济渭工程三河口水库拱坝坝基开挖揭露的岩体重新进行勘探试验,依据勘探试验结果对坝基岩体进行了详细的风化分带,对岩体的结构及完整性、强度及变形特征等工程特性进行了分析研究,建立了岩体变形模量与纵波波速关系($E_0 = 1.124 \times 10^6 v_p^{0.0006}$),解决了开挖现场不便测试变形模量的难题。同时对坝基岩体质量进行了工程地质分类,优选出合理的建基面,使大坝建基面高程由原来的501.0 m抬升至504.5 m,减少了坝基开挖与混凝土浇筑量,缩短了工期,节约了工程投资。

参考文献:

References:

- [1] 张兴安,蒋 锐,赵永辉,等.陕西省引汉济渭工程三河口水利枢纽工程地质勘察报告:初步设计阶段[R].西安:陕西省水利电力勘测设计研究院,2012.
ZHANG Xing-an, JIANG Rui, ZHAO Yong-hui, et al. Geological Investigation Report of Sanhekou Water Conservancy Project in Shaanxi Province: Preliminary Design Phase[R]. Xi'an: Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, 2012.
- [2] 罗 荣,李玉婕,肖国强,等.特高拱坝建基面岩体选择的工程类比法研究[J].长江科学院院报,2018,35(7):84-88.
LUO Rong, LI Yu-jie, XIAO Guo-qiang, et al. Criterion of Rockmass Selection for Super-high Foundation Based on Engineering Analogy Method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(7): 84-88.
- [3] 林 鹏,康绳祖,李庆斌,等.溪洛渡拱坝施工期岩体质量评价与坝体稳定分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):2042-2052.
LIN Peng, KANG Sheng-zu, LI Qing-bin, et al. Evaluation of Rock Mass Quality and Stability Analysis of Xiluodu Arch Dam Under Construction Phase[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 2042-2052.
- [4] 陈昌平.二滩水电站拱坝坝基岩体工程条件[J].水电站设计,1998,14(3):65-71.
CHEN Chang-ping. Rock Mass Engineering Conditions of Arch Dam Foundation of Ertan Hydropower Station[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1998, 14(3): 65-71.
- [5] 王仁坤.特高拱坝建基面嵌深优化的分析与评价[D].北京:清华大学,2007.
WANG Ren-kun. Analysis and Evaluation on Optimization of Design for Foundation Interface of Super High Arch Dam[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [6] 陈文理,向能武,王怀球.构皮滩水电站高拱坝建基岩体工程地质研究[J].人民长江,2006,37(3):14-16.
CHEN Wen-li, XIANG Neng-wu, WANG Huai-qiu. Engineering Geology Study on Foundation Rock Mass of High Arch Dam of Goupitan Hydropower Station[J]. Yangtze River, 2006, 37(3): 14-16.
- [7] 程 立,刘耀儒,陶灼夫,等.拱坝建基面开挖过程中不平衡力变化及处理效果研究[J].岩土工程学报,2017,39(9):1670-1679.
CHENG Li, LIU Yao-ru, TAO Zhuo-fu, et al. Variation of Unbalanced Force During Excavation of Arch Dam Base Surface and Treatment Effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1670-1679.
- [8] 杨剑锋,张俊德,谢文峰.锦屏一级大坝左岸建基面 f_2 断层处理施工技术[J].人民长江,2017,48(2):40-43.
YANG Jian-feng, ZHANG Jun-de, XIE Wen-feng. Treatment of f_2 Fault at Left Foundation Surface of Jinping I Arch Dam[J]. Yangtze River, 2017, 48(2): 40-43.
- [9] 邹 浩,晏鄂川,高 旭.某水电站施工期河床坝段建基面优化及校核[J].水力发电,2016,42(1):45-48.
ZOU Hao, YAN E-chuan, GAO Xu. Optimization and Check for the Foundation Surface on Riverbed Dam Section of a Hydropower Station During Construction Period[J]. Water Power, 2016, 42(1): 45-48.
- [10] 王仁坤.我国特高拱坝的建设成就与技术发展综述[J].水利水电科技进展,2015,35(5):13-19.
WANG Ren-kun. Review of Construction Achievements and Technological Development of Super-high Arch Dam in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 13-19.
- [11] 宋彦辉.宽阔河床坝基岩体质量与建基面选择研究:以金沙江向家坝水电站为例[D].成都:成都理工大学,2003.
SONG Yan-hui. Study on the Selection of Rock Mass

- and Foundation Surface of Wide Riverbed Foundation; Taking Xiangjiaba Hydropower Station in Jinsha River as an Example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2003.
- [12] 周维垣, 林 鹏, 周雅能, 等. 高拱坝基础大垫座及周边缝设置研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 1959-1967.
- ZHOU Wei-yuan, LIN Peng, ZHOU Ya-neng, et al. Research on Concrete Socket and Peripheral Joint for High Arch Dam Foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 1959-1967.
- [13] 饶宏玲, 曾纪全, 庞明亮, 等. 锦屏一级拱坝岩体抗剪强度参数取值研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(11): 7-11, 21.
- RAO Hong-ling, ZENG Ji-quan, PANG Ming-liang, et al. Determination of Shear Strength Parameters of Rock Mass of Jinping- I Arch Dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(11): 7-11, 21.
- [14] 万宗礼, 聂德新, 杨天俊, 等. 高拱坝建基岩体研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- WAN Zong-li, NIE De-xin, YANG Tian-jun, et al. Research and Practice on Foundation Rock Mass of High Arch Dam[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2009.
- [15] 王 超, 刘 翔. 大岗山拱坝建基面选择及基础处理加固研究[J]. 水电站设计, 2014, 30(2): 47-53.
- WANG Chao, LIU Xiang. Research on Foundation Surface Selection and Foundation Treatment and Reinforcement of Dagangshan Arch Dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2014, 30(2): 47-53.
- [16] 张 曼, 刘耀儒, 徐建军, 等. 杨房沟高拱坝建基面嵌深优化的分析与评价[J]. 水利水电技术, 2018, 49(7): 8-18.
- ZHANG Man, LIU Yao-ru, XU Jian-jun, et al. Analysis and Evaluation of Optimization on Embedded Depth of Foundation Surface for Yangfanggou High Arch Dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(7): 8-18.
- [17] 刘裕鸿. 高拱坝建基面相对损伤面积敏感性分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(7): 67-69, 44.
- LIU Yu-hong. Sensitivity Analysis of Relative Damage Area for High Arch Dam Foundation Plane[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(7): 67-69, 44.
- [18] 梁为邦. 某水库工程重力坝基础建基面的分析研究与确定[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(5): 551-555.
- LIANG Wei-bang. Analysis and Determination of Foundation Plane of Gravity Dam from a Reservoir Project[J]. Resources Environment and Engineering, 2015, 29(5): 551-555.
- [19] DL/T 5346—2006, 混凝土拱坝设计规范[S].
- DL/T 5346—2006, Code for Design of Concrete Arch Dams[S].
- [20] 王 栋, 张建华, 蒋 锐, 等. 陕西省引汉济渭工程三河口水利枢纽拱坝建基面优化专题报告[R]. 西安: 陕西省水利电力勘测设计研究院, 2016.
- WANG Dong, ZHANG Jian-hua, JIANG Rui, et al. A Special Report on the Optimization of the Construction of the Arch Dam of Sanhekou Water Conservancy Project in Shaanxi Province[R]. Xi'an: Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, 2016.
- [21] GB 50487—2008, 水利水电工程地质勘察规范[S].
- GB 50487—2008, Code for Geological Investigation of Water Conservancy and Hydroelectric Engineering[S].
- [22] 彭士标. 水力发电工程地质手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- PENG Tu-biao. Hydropower Engineering Geology Manual[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2011.
- [23] 陈祖安. 中国水力发电工程: 工程地质卷[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- CHEN Zu-an. Hydropower Engineering in China: Engineering Geological Volume[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [24] 罗纬邦, 卢冰华. 某混凝土双曲拱坝建基面选择研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(4): 60-63.
- LUO Wei-bang, LU Bing-hua. Study on Selection of Foundation Surface for a Concrete Double-curvature Arch Dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(4): 60-63.
- [25] 黄春华, 叶建群, 李应辉, 等. 龙开口水电站大坝建基面优化研究[J]. 水力发电, 2013, 39(2): 36-40.
- HUANG Chun-hua, YE Jian-qun, LI Ying-hui, et al. Optimization on Dam Foundation Surface of Longkaikou Hydropower Station[J]. Water Power, 2013, 39(2): 36-40.
- [26] 许仙娥, 段世委, 赵文超. 高坝建基面确定与坝基处理[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(5): 548-550.
- XU Xian-e, DUAN Shi-wei, ZHAO Wen-chao. Determination and Treatment of Foundation Rocks for Gomal Zam Dam Project[J]. Resources Environment and Engineering, 2015, 29(5): 548-550.