DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20242304

双港口水库坝基岩体工程地质分类与建基面选择

吴桐雯,张 涛,刘建磊

(黄河勘测规划设计研究院有限公司地质工程院,河南 郑州 450003)

摘要: 流纹质凝灰熔岩建基面选择是双港口水库的关键地质难题,也是决定拱坝坝基开挖的重要因素。为此,以双港口拱坝凝灰熔岩建基面岩体为例,以大量的勘察实测资料和原位试验为基础,开展了双港口拱坝岩体结构特征、风化程度和岩体工程地质分类研究,对拱坝建基面进行了选择和确定。结果表明,强风化带岩体类别为BⅣ$_1$类,弱风化上带岩体类别为AⅢ$_2$类,弱风化下带类别为AⅢ$_1$类,微新岩体类别为AⅡ类。根据工程拱坝受力分布特点,AⅢ$_2$、BⅣ类为风化卸荷带岩体,不宜直接作为拱坝基础,建基岩体主要为AⅢ$_1$类,建基条件较好,抗变形能力一般。

关键词: 拱坝;流纹质凝灰熔岩;岩体工程地质分类;建基面

中图分类号: TV223.1;TV642.4$^+$2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2025)11-0096-05

1 概况

江西省资溪县双港口水库作为堆石混凝土双曲拱坝,属于小(1)型水库,最大坝高为68 m,总库容约600×10^{4}m^3。地处华南褶皱系武夷山隆断束构造单元,为构造中低山剥蚀地貌。坝址地区岩石大多裸露,河床深窄(图1),出露岩性为侏罗系上统(J$_3$e)鹅湖岭组流纹质凝灰熔岩。流纹质凝灰熔岩建基面选择是双港口水库的关键地质难题,也是决定拱坝坝基开挖的重要因素。流纹质凝灰熔岩约占火成岩34%,广泛分布于福建、广东、长江中下游地区[1-2]。凝灰熔岩的工程地质研究虽已有部分报道[1-3],但对于坝基岩体的工程地质分类和建基面研究内容有限。为此,本文以双港口拱坝凝灰熔岩建基面岩体为例,以大量的勘察实测资料和原位试验为基础,开展了岩体结构特征、风化卸荷、岩体质量指标、岩体强度等研究内容,对坝基岩体进行工程地质分类及建基面进行选择。研究结果不仅能为双港口拱坝勘察设计提供地质依据,也为其他凝灰熔岩坝基的水利水电工程地质问题提供借鉴。

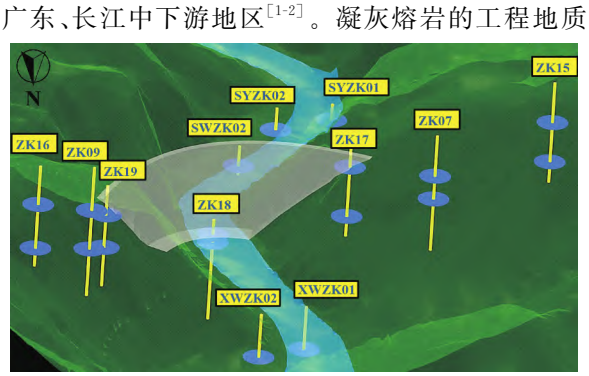


图1 坝址区钻孔分布与风化界面位置

Fig. 1 Distribution of boreholes and location of weathering interface in the dam site area

2 坝基岩体质量分类

2.1 坝基岩体质量分类地质因素

坝基岩体质量分级按照《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)[4],选择坝址区岩体结构、岩体风化卸荷、岩石强度、波速、岩体的完整性等指标作为坝基岩体质量分级的基本指标[5-7]。

2.1.1 岩体结构特征及岩性

坝址区地层单一,为侏罗系上统鹅湖岭组(J$_3$e)流纹质凝灰熔岩,青灰色、浅灰紫色,厚层,熔结凝灰结构,斑状结构,流纹构造。岩石薄片鉴定成果显示,斑晶含量20%~25%,斑晶主要为钾长石和石英,呈棱角碎屑状,粒径0.1~3.4 mm。基质含量约75%~80%,基质呈流纹构造,拉长现象明显,呈厚薄不均、长度不等的白色条纹

收稿日期: 2024-12-07,**修回日期:** 2025-01-07

基金项目: 黄河设计院第一类自主研究开发项目(2022KY001)

作者简介: 吴桐雯(1995-),女,硕士、工程师,研究方向为水利水电工程地质,E-mail:wutongwen0516@163.com

通讯作者: 刘建磊(1984-),男,硕士、教授级高级工程师,研究方向为水利水电工程地质,E-mail:jlliu@Yrec.cn

中国知网 https://www.cnki.net

状,隐晶质—玻璃质结构,岩石呈块状—次块状。

2.1.2 岩体风化与卸荷

坝址区岩体风化以物理风化作用为主,风化程度总体属弱风化,裂隙密集带局部为强风化。钻孔揭露,左岸坝肩覆盖层厚度 0.3～1.3 m,右岸 0.2～2.5 m,河床 2.9～4.3 m;强风化带厚度左岸 2.9～5.6 m,右岸 1.6～6.0 m,河床 0.7～2.4 m;弱风化上带厚度左岸 17.9～24.2 m,右岸 15.7～26.2 m,河床 5.5 m,弱风化下带厚度左岸 16.1～34.7 m,右岸 22.9～30.7 m,河床 5.5 m。

平硐揭露,左坝肩岩体强风化水平深度 3～4 m,弱风化上带水平最小深度 16 m,弱风化下带未揭穿;右坝肩岩体强风化水平深度 4～5 m,弱风化上带水平深度 20～29 m,弱风化下带未揭穿。坝址左右岸各布置 2 条平硐,根据《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)[4]中岩体卸荷带划分标准,坝肩两岸岩体强弱卸荷带水平深度见表 1。

表 1　坝址区平硐风化带、卸荷带划分结果

Tab. 1　Classification results of weathering zone and unloading zone in the dam site area

位置	平硐概况				风化深度/m			卸荷深度/m		地震波纵波波速/(km·s^{-1})	
	高程/m	编号	总长/m	主硐长/m	强风化	弱风化上带	弱风化下带	强卸荷	弱卸荷	强卸荷	弱卸荷
左岸	289.66	PD01	70.8	41.8	3.0	16.0	>22.8	11.0	>30.8	2.00	3.57～4.55
	325.01	PD02	60.6	30.8	4.0	>26.8		7.0	>23.8	2.04～2.67	3.85～4.55
右岸	307.62	PD03	63.8	33.5	4.0	20.0	>9.5	8.0	>25.5	2.04～2.38	3.57～4.55
	327.64	PD04	62.0	36.0	5.0	29.0	>2.0	9.0	>27.0	2.08～3.33	3.57～5.00

2.1.3 岩体质量指标(R_{RQD})

坝址区共布置 12 个钻孔进行岩体质量指标(R_{RQD})统计,坝址区流纹质凝灰熔岩 R_{RQD} 在 70%以上的约占统计数的 26.82%,R_{RQD} 在 40%以上的约占统计数的 63.69%,R_{RQD} 在 20%以上的约占统计数的 87.43%,反映出坝址区岩体基本质量总体较好。坝址区不同风化状态岩体与 R_{RQD} 统计划分见表 2。

表 2　坝址区各钻孔 R_{RQD} 统计结果

Tab. 2　R_{RQD} statistical results of each borehole in the dam site area

位置	钻孔编号	百分比/%			
		R_{RQD}≥70%	40%≤R_{RQD}<70%	20%≤R_{RQD}<40%	R_{RQD}<20%
河床	ZK18	51.52	33.33	9.09	6.06
左坝肩	ZK07	37.50	31.25	12.50	18.75
	ZK17	17.39	21.74	39.13	21.74
右坝肩	ZK09	34.62	44.23	11.54	9.62
	ZK19	33.33	33.33	28.21	5.13
左岸防渗线	ZK15	2.44	29.27	31.71	36.59
右岸防渗线	ZK16	7.89	36.84	50.00	5.26
上游围堰	SYZK01	30.00	70.00	0.00	0.00
	SYZK02	0.00	0.00	100.00	0.00
	SWZK02	40.00	40.00	20.00	0.00
下游围堰	XWZK01	33.33	57.14	9.52	0.00
	XWZK02	25.00	68.75	6.25	0.00
平均值		26.82	36.87	23.74	12.57

2.1.4 岩体强度

在坝址区共取得 22 组岩样进行室内岩石物理力学试验,按风化程度统计饱和单轴抗压强度范围值见表 3。

取弱风化上带流纹质凝灰熔岩 2 块,颗粒密度平均值 2.65 g/cm^3,干密度平均值 2.55 g/cm^3,含水率平均值0.77%,饱和静弹性模量平均值 35.66 GPa,单轴饱和抗压强度范围(小值均值～大值均值)值 46.1～101.4 MPa,平均值 79.3 MPa,软化系数平均值 0.70。

表 3　岩石饱和单轴抗压强度试验结果

Tab. 3　Results of rock saturated uniaxial compressive strength test

风化程度	颗粒密度/(g·cm^{-3})	饱和单轴抗压强度/MPa			软化系数
		小值平均值	大值平均值	平均值	
弱风化上带	2.65	46.1	101.4	79.3	0.70
弱风化下带	2.64	72.3	114.7	88.0	0.81
微新岩体	2.63	87.7	156.2	112.3	0.84

取弱风化下带流纹质凝灰熔岩 24 块,颗粒密度平均值 2.64 g/cm^3,干密度平均值 2.56 g/cm^3,含水率平均值 0.58%,饱和静弹性模量平均值 40.39 GPa,单轴饱和抗压强度 72.3～114.7 MPa,平均值 88.0 MPa,软化系数平均值 0.81,岩石耐风化和水浸能力强。岩石弹性模量和变形模量高,抗变形能力强。

微新流纹质凝灰熔岩 26 块,颗粒密度平均值 2.63 g/cm^3,干密度平均值 2.58 g/cm^3,含水率平均值 0.38%,饱和静弹性模量平均值 54.54 GPa,单轴饱和抗压强度范围值 87.7～156.2 MPa,平均值 112.3 MPa,软化系数平均值 0.84,岩石耐风化和水浸能力强。岩石弹性模量和变形模量高,抗变形能力强。

弱风化下带—微新流纹质凝灰熔岩属于坚硬岩石,饱和抗压强度、变形模量均较高,物理力学性质较好。

2.1.5 岩体波速及完整性

钻孔声波测试结果显示(表 4),强风化波速一般小于 3 000 m/s,弱风化上带岩体声波速度

中国知网　https://www.cnki.net

表 4 岩体各风化状态波速平均值统计

Tab. 4 Statistical of average wave velocity in various weathering states of rock mass m/s

风化状态	波速平均值						钻孔声波平均值	平硐地震波平均值
	ZK07	ZK15	ZK16	ZK17	ZK18	ZK19		
弱风化上带					3 884		3 884	2 040
弱风化下带	4 377	4 354	4 241	4 761	4 610	4 540	4 486	3 284
微新岩体	4 979	4 683	4 530	4 767	4 852	4 737	4 813	4 494

为 3 300～4 500 m/s;弱风化下带岩体声波速度为 3 800～5 000 m/s,;微风化—新鲜岩体的波速为 4 500～5 500 m/s。完整岩体声波速度值为 3 790～5 480 m/s,完整性系数一般为 0.76～0.82;较完整岩体声波速度值为 3 130～5 500 m/s,完整性系数一般为 0.57～0.74;完整性差岩体声波速度值为 2 320～4 030 m/s,完整性系数一般为 0.51～0.54。

平硐洞壁地震纵波波速结果显示,强风化岩体的纵波速为 2 000～2 080 m/s,岩体完整性系数为 0.13～0.14;弱风化上带岩体的纵波速为 2 380～3 850 m/s,岩体完整性系数为 0.19～0.49;弱风化下带岩体纵波速为 4 170～5 000 m/s,岩体完整性系数为 0.57～0.83。

2.1.6 岩体软弱结构面

作为双港口两岸岩体中的薄弱发育地带,缓倾角软弱结构面对拱坝抗滑稳定性具有重要影响[8-9]。流纹质凝灰熔岩岩体的缓倾角结构面发育,降低了结构面的抗剪强度和岩体的变形模量,破坏岩体完整性,进而影响坝基岩体分类与建基面选择。坝址区流纹质凝灰熔岩软弱结构面属于岩屑夹泥型,具有各向异性和不均一性,分别揭露于 290、308、328 m 平硐开挖高程,最为不利的结构面组合模式位于右岸 308 m 高程,结构面中型剪试验 τ-σ 成果曲线见图 2。

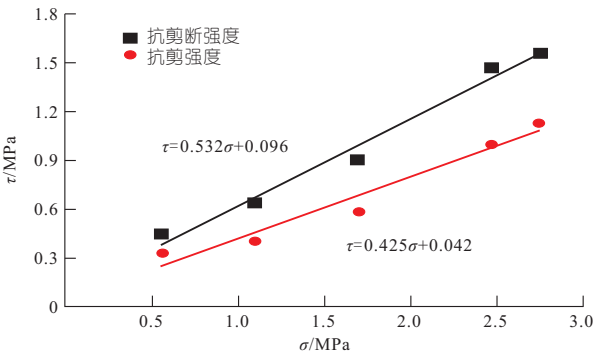


图 2 软弱结构面中型剪试验 τ-σ 曲线

Fig. 2 Direct shear test of τ-σ relationship curve

2.2 坝基岩体质量分类结果

按《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)[4],结合岩体物理力学性质、现场波速、钻孔岩芯成果等,综合类比同类工程[10-12],给出坝址区坝基岩体工程地质分类(表 5)。

2.3 地质建议值

坝址区开展了现场岩体直剪试验、现场岩体变形试验、现场岩体与混凝土直剪试验、软弱结构面中型剪试验,根据现场原位测试结果,并参考同类工程坝基岩体工程地质分类结果[13-14],提出坝基各类岩体物理力学参数地质建议值(表 6)。本

表 5 坝址区坝基岩体工程地质分类

Tab. 5 Engineering geological classification of dam foundation rock mass at dam site

风化状态	卸荷状态	岩体结构特征	岩体质量评价	岩体主要特征值	质量分类
强风化	强卸荷	岩体呈碎块状构造,节理裂隙发育,结合差,贯通性好,存在不利于坝基及坝肩稳定的结构面或楔形体	岩体破碎、完整性差,强度较高,不能作为刚性坝坝基	30 MPa<R_b<60 MPa R_{RQD}<20% V_p=2 500～3 500 m/s K_v<0.35	BⅣ$_1$
弱风化上带	弱卸荷	岩体主要呈次块状构造,局部为块状构造,节理裂隙中等发育～发育,岩体中分布有缓倾角或陡倾角软弱结构面,存在影响坝基或坝肩稳定的楔形体	岩体完整性差,强度较高,抗滑、抗变形性能在一定程度上受结构面控制	R_b>60 MPa 20%≤R_{RQD}<40% V_p=3 000～4 500 m/s K_v=0.35～0.55	AⅢ$_2$
弱风化下带		岩体主要呈块状构造,局部为次块状构造,节理裂隙中等发育,岩体中局部分布有缓倾角或陡倾角软弱结构面,基本不存在影响坝基或坝肩稳定的楔形体	岩体较完整,强度较高,抗滑、抗变形性能较好,专性地基处理工程量不大,是良好的刚性坝基	R_b>60 MPa 40%≤R_{RQD}<70% V_p=4 000～4 500 m/s K_v=0.55～0.75	AⅢ$_1$
微新岩体	未卸荷	岩体呈块状,节理裂隙不发育～中等发育,岩体中不存在影响坝基或坝肩抗滑稳定的楔体	岩体完整,强度高,抗滑、抗变形性能较高,是良好的刚性坝坝基	R_b>60 MPa R_{RQD}≥70% V_p>4 500 m/s K_v>0.75	AⅡ

注:R_b 为饱和单轴抗压强度;V_p 为声波纵波波速;K_v 为岩体完整性系数。

中国知网 https://www.cnki.net

表 6　岩体物理力学指标建议值

Tab. 6　Recommended values for physical and mechanical indicators of rock mass

岩体类型	变形模量 E_0/MPa	抗剪断强度		抗剪强度 f
		内摩擦角 f'/(°)	粘聚力/MPa	
AⅡ	7～10	1.1～1.2	1.2～1.4	0.65～0.7
$AⅢ_1$	5～7	0.9～1.1	0.9～1.2	0.6～0.65
$AⅢ_2$	4～6	0.7～0.9	0.7～0.9	0.55～0.6
$BⅣ_1$	2～5	0.6～0.7	0.5～0.7	0.5～0.55

文工程设计取值时,主要根据建筑物部位的具体地质条件,取相应地质参数计算采用。一般取类别岩体地质建议值的平均值,岩体完整时取上限值,完整性欠佳取下限值,并随岩体性状特征及工程埋深在建议值范围内进行调整。

3　拱坝建基面选择

河床覆盖层主要由漂石、卵砾石夹砂等组成,厚度 2.9～4.3 m;两岸坝肩覆盖层主要由碎石土及粉质粘土等组成,坡积物厚度 0.2～2.0 m,覆盖层承载力和变形模量低,不能满足建基要求,应全部清除。

强风化流纹质凝灰熔岩为 $BⅣ_1$ 类岩体,岩体完整性差,结构面发育,抗滑、抗变形性能差,不宜作为建基面基础。

弱风化上带流纹质凝灰熔岩为 $AⅢ_2$ 类岩体,岩体物理力学性质和岩体完整性差,岩体内发育缓倾角软弱结构面,不宜直接作为拱坝基础,作为建基面基础需经计算复核。

弱风化下带流纹质凝灰熔岩为 $AⅢ_1$ 类岩体,岩体强度较高,抗滑及抗变形性能较好,是良好的建基面基础。

微风化流纹质凝灰熔岩为 AⅡ 类岩体,是良好的建基面基础。

3.1　左岸坝基建基面

左岸坝肩共完成 4 个钻孔,并进行孔壁光学成像、波速测试和水文地质试验,根据坝基岩体工程地质分类结果,左岸约 326 m 高程以上表层分布有碎石土、砂质粘土等第四系残坡积覆盖层,残破积覆盖层厚 0.5～1.3 m,物质相对较松散,物理力学性能较差。326 m 高程以下为基岩段,强风化岩体一般厚 2.9～4.6 m,弱风化上带岩体厚 18.6～24.2 m,坝体位于弱卸荷带。

结合拱坝受力特征,建议坝基挖除地表覆盖层、强风化层、弱风化上带,将拱端置于 $AⅢ_1$ 类弱风化下带岩体或 AⅡ 类微风化岩体中(图 3)。

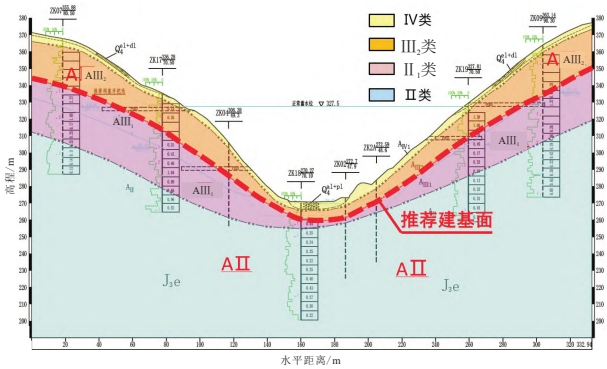


图 3　坝基岩体质量及建基面选择

Fig. 3　Quality of dam foundation rock mass and selection of foundation surface

坝基未出露断层,拱端开挖过程中对软弱结构面、节理密集带及不利于坝基稳定的岩体,需采取挖除、支护等工程处理措施。

3.2　河床坝基建基面

河床坝基主流线共完成 3 个钻孔,并进行了光学成像、波速测试和水文地质试验。河床冲洪积覆盖层厚 2.9～4.3 m,主要为漂石、块石、砂卵砾石层,基岩面高程 262～267 m,强风化岩体一般厚 0.7～2.4 m,弱风化上带岩体厚约 5.5 m。坝基岩体质量以 $AⅢ_1$ 类为主,浅表层为弱卸荷岩体,裂隙发育,沿裂隙可见似溶蚀斑痕,以下为微风化—新鲜岩体。

河床覆盖层以下风化卸荷不深,根据拱坝受力状况,河床坝基受力较小,$AⅢ_1$ 类弱风化下带岩体可作为河床坝基建基岩体。建议坝基挖除地表覆盖层、强风化层、弱风化上带,将拱端置于 $AⅢ_1$ 类弱风化下带岩体中。坝基未出露断层,拱端开挖过程中对软弱结构面、节理密集带及不利于坝基稳定的岩体,需采取挖除、支护等工程处理措施。

3.3　右岸坝基建基面

右岸坝肩共完成 5 个钻孔,并进行了波速测试和水文地质试验,根据坝基岩体工程地质分类成果,右岸浅表层第四系残破积层发育较少,残破积覆盖层厚 0.2～2.5 m,大多数为基岩段。强风化岩体一般厚 1.6～6.5 m,弱风化上带岩体厚 15.7～26.2 m,坝体位于弱卸荷带。

结合拱坝受力特征,建议坝基挖除地表覆盖层、强风化层、弱风化上带,将拱端置于 $AⅢ_1$ 类弱风化下带岩体或 AⅡ 类微风化岩体中。坝基未出露断层,拱端开挖过程中对软弱结构面、节理密集带及不利于坝基稳定的岩体,需采取挖除、支护等工程处理措施。

中国知网　https://www.cnki.net

4 结论

a. 本文以双港口拱坝凝灰熔岩建基面岩体为例，以大量的现勘察实测资料和原位试验为基础，开展了双港口拱坝岩体结构特征、风化程度和岩体工程地质分类研究，对拱坝建基面进行了选择和确定，为工程设计和施工提供了明确的数据及地质建议。

b. 对双港口拱坝坝基岩体工程地质进行分类，强风化带、弱风化上带、弱风化下带、微新岩体类别分别为 BⅣ$_1$、AⅢ$_2$、AⅢ$_1$、AⅡ。根据本文工程拱坝受力分布特点，AⅢ$_2$、BⅣ类为风化卸荷带岩体，厚度小于 20 m，不宜直接作为拱坝基础，建议挖除。

c. 建基岩体主要为 AⅢ$_1$ 类，建基条件较好，抗变形能力一般，建议将拱坝下部、上部及河床部位位于 AⅢ$_1$ 类弱风化下带岩体，拱坝中部应力集中区域建议建基面位于 AⅡ类微风化岩体，局部风化岩体应进行深挖回填混凝土处理。

参考文献：

[1] 魏国安. 闽南风化凝灰熔岩强度特性的试验研究[J]. 地震工程学报，2013，35(3)：625-630，640.

[2] 章仕灵，邓涛. 风化凝灰熔岩物理和力学特性的试验研究[J]. 山西建筑，2020，46(20)：95-97.

[3] 马雨峰，左永振，刘双华，等. 弱风化凝灰熔岩料的湿化变形试验研究[J]. 黑龙江水利科技，2018，46 (11)：1-4，64.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部，国家质量监督检验检疫总局. 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.

[5] 彭土标. 水力发电工程地质手册[M]. 北京：中国水利水电出版社，2011.

[6] 胡剑峰，张学东，顾明刚，等. RMR 分类在坝基岩体中的应用——基于巴基斯坦某水电站实例分析[J]. 华北自然资源，2023(3)：69-73.

[7] 倪卫达，单治钢，刘晓. 基于三维节理网络模拟的坝基岩体结构分类研究[J]. 岩土力学，2018，39(1)：287-296.

[8] 王强翔. 涔天河水库扩建工程软弱结构面工程地质特性研究[J]. 湖南水利水电，2019(6)：18-20.

[9] 蔡耀军，徐福兴. 大坝建基岩体抗剪强度取值[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21(7)：1040-1044.

[10] 柴乃杰，周文梁. 基于优化组合权-模糊可变集的坝基岩体质量分级[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(2)：514-525.

[11] 曹荣国，任佳宽. 新疆某工程坝基岩体质量评定标准确立与应用[J]. 云南水力发电，2022，38(2)：101-103.

[12] 刘银. 雅砻江孟底沟水电站坝基岩体质量分级研究[D]. 成都：成都理工大学，2015.

[13] 杨勇建. 黄家沟水库坝址区工程地质条件分析与坝型优选[J]. 河南科技，2022，41(13)：52-55.

[14] 杨秀程. 金沙江上游叶巴滩水电站坝址区岩体质量评价[D]. 成都：成都理工大学，2015.

Engineering Geological Classification and Foundation Surface Selection of Shuanggangkou Arch Dam

WU Tong-wen, ZHANG Tao, LIU Jian-lei

(Geotechnical Engineering Department, Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The selection of the foundation surface of the flowing tuffaceous lava is a major engineering geological issue for the Shuanggangkou Arch Dam and a key factor affecting the excavation of the arch dam foundation. Taking the tuff lava foundation surface rock mass of the Shuanggangkou Arch Dam as the research object, based on a large amount of field survey data and in-situ experiments, this paper conducts research on the structural characteristics, weathering degree, and engineering geological classification of the rock mass of the Shuanggangkou Arch Dam, and selects and determines the foundation surface of the arch dam. The results show that the rock mass in the strongly weathered zone belongs to Class BⅣ$_1$, the rock mass in the weakly weathered upper zone belongs to Class AⅢ$_2$, the rock mass in the weakly weathered lower zone belongs to Class AⅢ$_1$, and the rock mass in the slightly new zone belongs to Class AⅡ. According to the stress distribution characteristics of the arch dam, AⅢ$_2$ and BⅣ are weathered unloading zone rock masses, which are not suitable for direct use as arch dam foundations. The foundation rock mass is mainly AⅢ$_1$, with good foundation conditions and average deformation resistance.

Key words: arch dam; flowered tuffaceous lava; geological classification of rock mass engineering; foundation surface

中国知网 https://www.cnki.net