

坝基岩体开挖卸荷松弛效应工程特性研究*

蔡斌,徐敬武,朱可俊

(中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司,成都 610072)

摘要:大岗山水电站位于大渡河中游,为混凝土双曲拱坝,坝高210m。由于河谷狭窄,谷坡高陡,地应力较高,坝基岩体开挖过程中产生了强烈的卸荷松弛。本文基于现场地质环境调查、声波检测,结合声波孔波速值和声波衰减率,分析了开挖卸荷松弛的典型特征及其松弛机理,归纳了卸荷松弛类型。通过分析岩体质量与检测成果在时间、空间上的关系得出了坝基岩体开挖卸荷松弛的时间、空间效应,并对坝基岩体开挖卸荷松弛时空效应与其建造、蚀变及构造的关系进行了地质分析研究。深入研究高拱坝建基岩体开挖松弛工程特性,可为高坝建基面的合理选择、松弛岩体工程处理提供科学依据。

关键词:高拱坝;岩体开挖;卸荷松弛;时空效应;松弛带

中图分类号:O317.56

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1313-09

Study on Characteristics and Engineering Properties of in a Dam Hydropower Station

Cai Bin, Xu Jingwu, Zhu Kejun

(Chengdu Engineering Co. Ltd., Power China, Chengdu 610072, P.R. China)

Abstract: The Dagangshan hydropower station is located in the middle reaches of the Dadu River, which is a concrete double curvature arch dam and dam height is 210 M. Because of the narrow valley, steep slopes and high ground stress, rock mass of dam foundation excavation process produces a strong unloading. Based on the field investigation of geological environment, acoustic detection, acoustic wave velocity value and combined with acoustic attenuation rate, the typical characteristics of excavation unloading relaxation and the relaxation mechanism were analyzed, the unloading relaxation type was summarized. Through the analysis of rock mass quality and test results in time and space, the rock mass of dam foundation excavation unloading relaxation time, the space effect, and the rock mass of dam foundation excavation unloading time effect relationship with construction, alteration and structure of geological analysis. Study of high arch dam foundation rock mass excavation engineering characteristics of relaxation can provide a scientific basis for a reasonable choice of surface and relaxation of rock mass engineering treatment.

Keywords: high arch dam; rock mass excavation; unloading relaxation; spatiotemporal effect; relaxation zone

0 引言

大岗山水电站位于大渡河中游,电站正常蓄水位1 130.00 m,总库容7.42亿m³,电站装机容量2 600 MW。设计坝型为混凝土双曲拱坝,最大坝

高210 m,坝顶高程1 135.00 m,河床建基面高程925.00 m^[1]。

由于坝区地质环境复杂,河谷狭窄,谷坡高陡,地应力值较高(表1),在坝基大规模开挖过程中,建基面以下一定深度范围内原有应力平衡状态被

* 收稿日期:2018-04-16(修改稿)

作者简介:蔡斌(1980-),男,四川巴中人,硕士,高级工程师,主要从事水电工程地质勘察与岩土工程勘察设计。

E-mail:329324012@qq.com

打破,岩体进行二次应力调整,建基面以里出现不同程度的应力分带,建基岩体表层产生相应的变形破坏现象并形成一定深度范围的松弛岩体,即产生所谓的开挖卸荷松弛效应,出现“葱皮”和“板裂”等现象^[2]。岩体开挖卸荷松弛产生的变形破坏、松弛时间、破坏程度、松弛范围、强度及变形模量的衰减等现象所带来的岩体稳定及岩体性状劣化问题对工程影响是多方面的。研究坝基岩体开挖卸荷松弛特征及其工程效应问题是高拱坝水电站建设期建基面开挖最为关注的问题之一,也是工程设计和施工中面临的一个关键技术问题,这对建基面的合理选择及科学施工,保证施工期边坡稳定和建基面岩体质量至关重要^[3]。

表1 岩体应力测试成果表

Table 1 Rock mass stress test results

测试方法	测点编号	测点岩性	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa
孔径变形法	σ PD-1		22.19	15.51	9.73
	σ PD-2		20.15	13.70	7.12
	σ PD-3	黑云二长花岗岩	18.50	10.01	4.75
	σ PD-4		13.01	10.10	2.43
	σ PD-5		11.37	9.96	2.90
	σ PD-6		19.28	10.70	4.58
	σ PD-7		7.67	5.95	3.39

1 坝基工程地质概况

大岗山水电站坝址区河谷呈“V”形峡谷,两岸山体雄厚,谷坡陡峻,基岩裸露,自然坡度一般 $40^\circ \sim 65^\circ$ 。坝基岩体主要为澄江期灰白色、微红色中粒黑云二长花岗岩(γ_2^{4-1}),有辉绿岩脉(β)、花岗细晶岩脉(γ_L)等脉岩穿插发育(图1),岩脉走向近SN,向西陡倾,多数较破碎。工程区位于川滇南北向构造带北段,地质史上构造-热液活动强烈,岩石均发生了不同程度的蚀变。坝址区断层主要有3组,即近SN向、NNW向和NNE向,多沿辉绿岩岩脉发育,断层破碎带宽一般 $0.1 \sim 3.0$ m,由片状岩、碎粉岩、角砾岩等组成。坝址区裂隙发育具有区段性,主要有6组,以陡倾角裂隙为主,缓倾角裂隙局部密集发育。坝基岩体主要为微新、无卸荷岩体,局部分布少量弱风化、弱卸荷岩体。坝址区应力场是构造应力和自重应力叠加的应力场,其作用

方向表现为NWW~SEE向挤压,岩体中应力集中现象明显,最大水平应力的数值高达 $18 \sim 26$ MPa,处于中高应力状态^[1]。

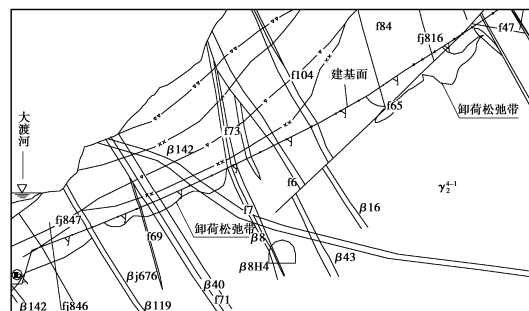


图1 坝基典型地质剖面图

Fig. 1 Typical geological profile of dam foundation

2 坝基岩体开挖松弛宏观特征

2.1 坝基岩体变形松弛特征

(1)“葱皮”和“板裂”现象^[4,5]:坝基开挖卸荷应力快速调整,在完整岩体表层出现平行于开挖面的薄层岩体脱离,其厚度一般不超过20 cm(图2)。



(a)左岸坝基960 m高程



(b)右岸950 m~930 m高程坝基

图2 “葱皮”和“板裂”现象

Fig. 2 Scallion skin and spalling phenomenon

(2)沿原有刚性结构面的松弛、开裂:建基面

开挖后,应力的调整使得结构面回弹张开、宏观显现,此类现象主要发生在Ⅱ~Ⅲ₂类岩体中(图3)。



(a)左岸下游边坡950~940 m高程



(b)右岸950~940 m高程坝基

图3 沿原有结构面的松弛、开裂

Fig. 3 Relaxation and cracking along the original structure

(3)块体松弛:原岩中早期发育有多组结构面,组合形成一定规模的块体,开挖作用下,上部覆重卸除、地应力释放,沿原有结构面开裂,局部导致块体位移甚至失稳(图4(a))。

(4)辉绿岩脉整体松弛:建基面开挖后,辉绿岩脉隐微裂隙显现,显示岩体卸荷松弛现象(图4(b))。

(5)沿平缓结构面的位错:坝区岩体中发育的缓倾结构面,在建基面开挖后上盘产生向临空方向的差异回弹(图5)。

2.2 岩体松弛类型划分

按坝基岩体开挖卸荷松弛的成因可将坝基岩体松弛分为以下几个类型^[6]:

(1)卸荷回弹型:主要发生在原岩应力量值高的微风化~新鲜岩石中,其内因为岩石在成岩建造、构造运动及表生改造过程中已然产生的微观~细观破坏,开挖爆破、建基面形成、应力调整使表浅部新鲜岩体向临空方向产生位移,岩体(岩石)产生新的开裂而扩容(主要包括葱皮、板裂),或使原有微细裂隙、结构面扩展、搭接、贯穿而产生变形松弛(如沿原有刚性结构面松弛、平缓面差异回弹位错等)。



(a)左岸坝基930 m高程块体松弛



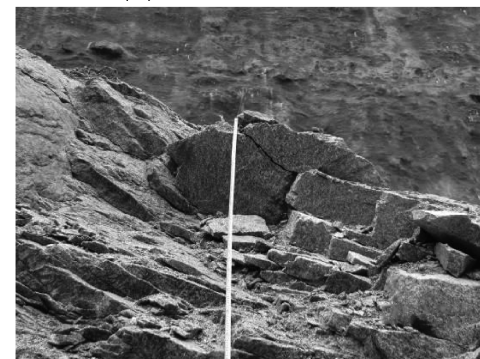
(b)右岸坝基980 m高程岩脉整体松弛

图4 块体松弛及岩脉整体松弛

Fig. 4 Block relaxation and overall relaxation of the vein



(a)左岸坝基963 m高程



(b)右岸坝基950~930 m高程

图5 平缓结构面位错

Fig. 5 Flat structural dislocation

(2)结构松弛型:主要发生在小断层等软弱结

构面出露地段、裂隙密集带、结构面不利组合部位,以及隐微裂隙发育的辉绿岩脉出露部位。主要表现为结构面张开、位错、块体蠕滑等。在此过程中,与开挖面夹角较小的结构面起主导性作用,松弛现象主要为块体松弛和辉绿岩脉整体松弛。

(3)爆破松弛型:主要发生在建基面极浅表层及多空间交叉开挖地段,岩体松弛有足够的释放空间,如灌浆平洞、排水平洞洞口及与建基面相交的洞室走廊地段,强大的爆炸冲击波使原有各种形迹的结构面普遍张开,岩体完全破坏。岩石中早期形成的隐微裂隙宏观显现,新生爆破裂隙多呈似层状板裂。

3 卸荷松弛机理及松弛带划分

3.1 开挖卸荷岩体松弛机理

大岗山高拱坝坝基在河床谷底大规模开挖,使得建基岩体原有天然应力平衡状态被打破,二次应力快速调整,岸坡应力增高带向深部转移,建基面附近应力松弛,主应力的方向与大小均发生了较大的变化。

岩体在变形破坏过程中,一方面岩体的内部结构和外形不断发生变化,另一方面其应力状态也随之不断调整,并引起弹性能积存与释放效应。压应力本身不会对岩体产生破坏,但不同大小的压应力将在岩体中产生不同的剪应力及拉应力,从而导致岩体破坏,即岩体破坏总是剪应力、拉应力或拉剪

复合造成的^[7,8]。

3.2 岩体开挖松弛带

坝基岩体开挖松弛带的划分主要根据岩体的平均波速及波速衰减率进行,同时,结合钻孔全景图像的裂隙开度情况及波速曲线特征,岩体的波速衰减率为岩体爆破及卸荷波速总衰减率^[9]。根据上述指标,坝基岩体松弛带分为强松弛带、弱松弛带及基本正常带,各松弛带标准如下:

(1)强松弛带:岩体爆破及卸荷波速总衰减率大于25%(辉绿岩大于30%),岩体裂隙发育,裂隙面一般呈张开~微张,间距一般小于0.3 m,波速曲线起伏大,强松弛带的各类岩体平均波速较基本正常带的平均波速低500 m/s以上。

(2)弱松弛带:岩体爆破及卸荷波速总衰减率介于10%~25%(辉绿岩为10%~30%),岩体裂隙较发育,裂隙面一般呈微张~闭合,间距一般介于0.3~1.0 m,波速曲线有一定起伏,弱松弛带的各类岩体平均波速介于强松弛带和基本正常带之间。

(3)基本正常带:岩体爆破及卸荷波速总衰减率小于10%,岩体裂隙不发育,裂隙面一般呈闭合,间距一般大于1.0 m,波速曲线起伏较小,基本正常带的岩体平均波速一般大于该类岩体的原状波速。

综合各分类标准及各类岩体的波速统计成果,对坝基岩体松弛带的平均波速及波速总衰减率的标准如表2。

表2 坝基岩体松弛带的划分标准

Table 2 Dividing standard of relaxation zone of dam foundation rock mass

岩性	岩体类别	平均波速/(m·s ⁻¹)			岩体卸荷波速总衰减率/%		
		强松弛带	弱松弛带	基本正常带	强松弛带	弱松弛带	基本正常带
花岗岩	II	<4000	4000~4500	>4500			
	III ₁	<3500	3500~4000	4000~4500	>25	25~10	<10
	III ₂	<3000	3000~3500	3500~4000			
辉绿岩 (脉岩)	III ₁	<4000	4000~4500	>4500			
	III ₂	<3500	3500~4000	>4000	>30	30~10	<10

4 卸荷松弛时空效应特征分析

坝基岩体松弛的时空效应是指岩体从天然状态到开挖直至混凝土浇筑期间,岩体松弛随着观测

周期延长及沿垂直建基面方向表现出的一系列效应,如岩体声波速度减小,波速总衰减率增加,岩体裂隙数量及张开度增加等效应^[9-10]。

4.1 岩体开挖卸荷松弛的时间效应

(1)平均波速降低,根据岩体在长观初期与长观末期的平均波速(表 3),Ⅱ类、Ⅲ₁类花岗岩 15 m 以上孔段一般降低 250~700 m/s,15 m 以下孔段一般降低 200~300 m/s;Ⅲ₂类花岗岩 2 m 以

上孔段降低约 400 m/s,2 m 以下孔段一般降低 200~400 m/s;Ⅲ₁类辉绿岩一般降低 200~400 m/s;Ⅲ₂类辉绿岩 15 m 以上孔段一般降低 400~500 m/s,15 m 以下孔段降低约 400 m/s。

表 3 长观初期与末期岩体平均波速变化情况表

Table 3 The variation of average wave velocity of rock mass at the beginning and the end of long view

孔深/m	大岗山花岗岩						大岗山辉绿岩			
	Ⅱ类		Ⅲ ₁ 类		Ⅲ ₂ 类		Ⅲ ₁ 类		Ⅲ ₂ 类	
	初期	12个月	初期	9个月	初期	12个月	初期	9个月	初期	9个月
0.0~2.0	3 614	3 000	2 985	2 664	2 775	2 321	3 029	2 657	2 419	1 954
2.0~5.0	4 111	3 414	3 859	3 465	3 420	3 007	4 494	4 045	3 022	2 498
5.0~10.0	4 499	3 905	3 922	3 579	3 878	3 560	4 958	4 777	3 186	2 738
10.0~15.0	4 850	4 292	4 252	3 995	3 923	3 618	/	/	4 400	4 015
15.0~20.0	4 850	4 514	4 310	4 100	3 932	3 731	/	/	4 825	4 469

(2)波速衰减率升高,根据岩体波速衰减率及波速衰减时间效应(图 6~7),观测期 12 个月的岩体波速衰减率在 0.0~5.0 m 较大,0.0~2.0 m 段的波速衰减率介于 16.67%~18.12%,2.0~5.0 m 段的波速衰减率一般介于 13.77%~14.96%(大理岩为 5.40%);5.0 m 以下岩体波速衰减率小于 10%。

花岗岩及辉绿岩大部分孔段在长观期间波速衰减未趋于收敛或波速衰减趋于收敛的时间较长,

松弛的时间效应明显。辉绿岩随时间波速衰减率大于花岗岩,且波速衰减率小于 1%趋于收敛的时间亦长于花岗岩。

(3)岩体裂隙数量及张开度增加,根据长观孔全景图像成果,对岩体在局部典型孔深段的裂隙开度比及裂隙数量比进行统计(表 4)。由表可看出,坝基岩体在开挖完成后,随着岩体卸荷时间的增加,岩体裂隙张开度及裂隙数量也随之增加。

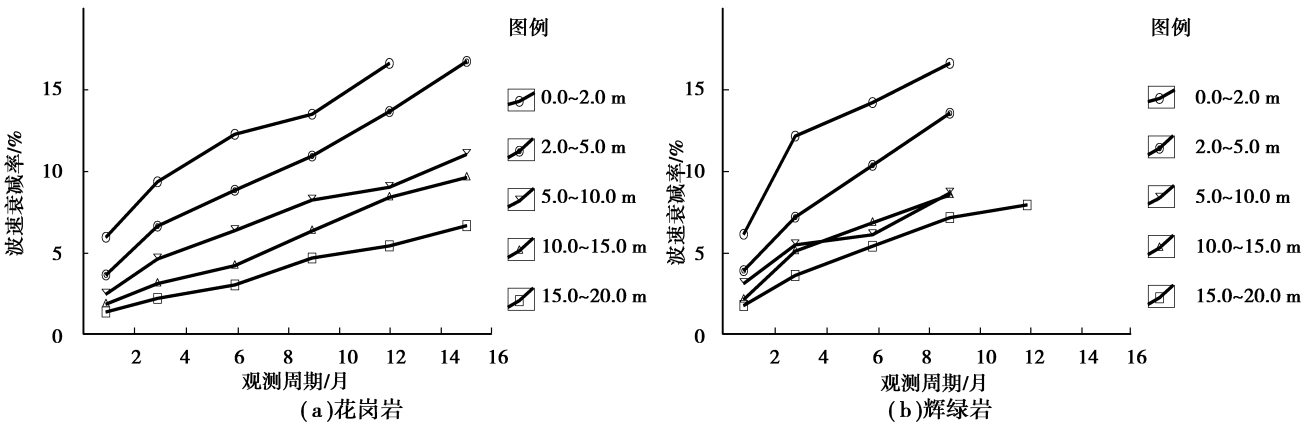


图 6 岩体波速平均衰减率

Fig. 6 Average attenuation rate of wave velocity of rock mass

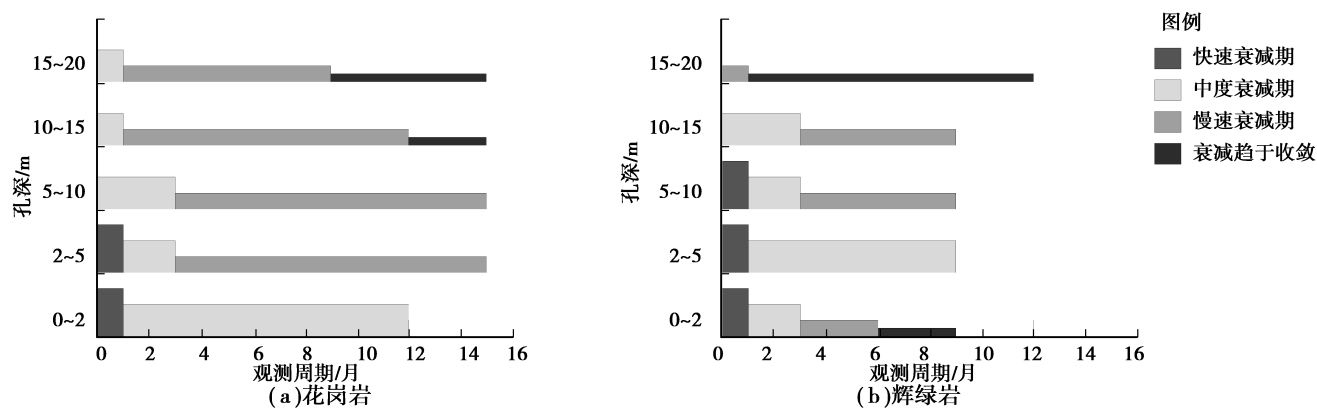


图 7 岩体波速衰减时间效应
Fig. 7 Time effect of wave velocity attenuation in rock mass

表 4 大岗山坝基岩体的裂隙开度比及数量比统计表

Table 4 Statistics of dagangshan dam foundation rock fracture aperture ratio and the number ratio

观测周 期/月	Ⅱ类花岗岩(0~2 m)		Ⅲ ₂ 类花岗岩(0~2 m)		Ⅴ ₁ 类花岗岩(2~4 m)		Ⅲ ₁ 类辉绿岩(8~10 m)	
	开度比	数量比	开度比	数量比	开度比	数量比	开度比	数量比
1	1.50	1.05	1.04	1.03	1.02	1.0	1.12	1.60
2	1.81	1.09	1.08	1.06	1.03	1.0	1.25	1.95
3	2.06	1.13	1.12	1.08	1.04	1.0	1.30	2.15
4	2.26	1.16	1.16	1.09	1.04	1.0	1.35	2.30
5	2.50	1.19	1.19	1.11	1.05	1.0	1.38	2.38
6	2.64	1.21	1.21	1.11	1.05	1.0	1.4	2.45
7	2.74	1.22	1.29	1.12	1.05	1.0	1.4	2.50
8	2.83	1.23	1.33	1.13	1.05	1.0	/	/
9	2.90	1.24	1.36	1.13	1.05	1.0	/	/
10	2.95	1.24	1.37	1.13	1.05	1.0	/	/
11	2.98	1.25	1.38	1.14	1.05	1.0	/	/
12	3.00	1.25	1.38	1.14	1.05	1.0	/	/

注:表中“/”表示无该观测周期的测试数据。

4.2 岩体开挖卸荷松弛的空间效应

(1)根据岩体声波测试成果统计分析,按坝基岩体松弛带的划分标准,对坝基长观孔初期及末期强、弱松弛带的深度进行对比,得到坝基岩体松弛带随深度的变化情况(表 5),并绘制长观初期及末期岩体在不同孔深段的平均波速及波速总衰减率曲线图(图 8)。

据表 5 可知,Ⅱ类花岗岩、Ⅲ₂类辉绿岩的强、弱松弛带深度均发生变化,具有较强的空间效应;Ⅲ₁类花岗岩、Ⅲ₁类辉绿岩的强、弱松弛带深度部

分发生变化,具有一定的空间效应;Ⅲ₂类花岗岩的强、弱松弛带深度在长观前后未发生变化,空间效应较弱。

由图 8 可看出,随着孔深的增加,波速衰减率由孔口向孔底方向逐渐减小,波速衰减较大的主要集中在 0.0~5.0 m,5.0 m 以下波速衰减逐步减小;随着岩体质量降低衰减率加大的趋势。随着孔深的增加,岩体波速平均月衰减率总体表现为下降趋势,但有一定起伏,沿深度方向波速平均月衰减率下降收敛性随岩体质量降低逐渐变好,波速衰减影

响深度一般集中在 0.0~5.0 m,部分岩类波速衰减影响深度较大。

(2)根据全景图像测试成果,综合裂隙开度比和裂隙数量比(表 6)两个方面分析,Ⅱ类花岗岩及

Ⅲ₁类辉绿岩全景图像沿孔深方向具有较强的空间效应,Ⅲ₂类花岗岩全景图像沿孔深方向具有一定的空间效应,辉绿岩由于隐微裂隙较发育,开挖松弛后其裂隙数量比及开度比均较大。

表 5 坝基岩体松弛带深度随时间的变化情况表
Table 5 The variation of the relaxation zone depth with time in dam foundation

岩体类别	观测周期/月	强松弛深度/m		弱松弛深度/m	
		长观初期	长观末期	长观初期	长观末期
Ⅱ类花岗岩	12	0.0~2.0	0.0~5.0	2.0~5.0	5.0~15.0
Ⅲ ₁ 类花岗岩	9	0.0~2.0	0.0~2.0	2.0~5.0	2.0~10.0
Ⅲ ₂ 类花岗岩	12	0.0~2.0	0.0~2.0	2.0~5.0	2.0~5.0
Ⅲ ₁ 类辉绿岩	9	0.0~2.0	0.0~2.0	*	2.0~5.0
Ⅲ ₂ 类辉绿岩	9	0.0~5.0	0.0~10.0	5.0~10.0	*

备注:“*”表示不存在该松弛带,表中字体加粗实线和字体加粗虚线分别表示强松弛带和弱松弛带深度随时间已发生变化,未划线的表示深度未发生变化。

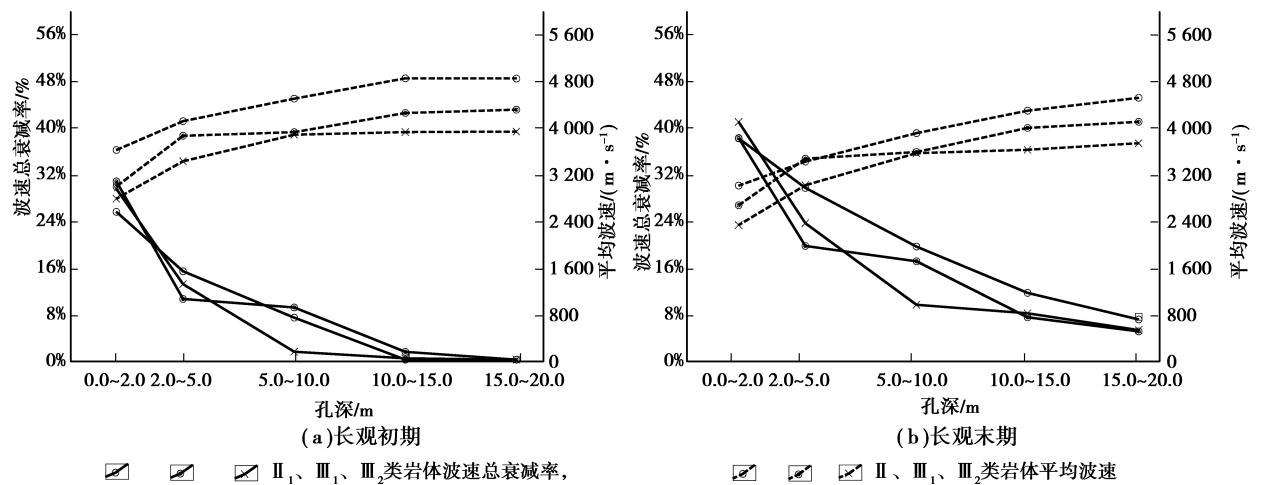


图 8 坝基花岗岩长观孔波速总衰减率及平均波速曲线图

Fig. 8 The total attenuation rate and the average wave velocity curve of the long hole in the granite mass of the dam foundation

表 6 大岗山坝基岩体全景图像测试成果统计表
Table 6 Statistics results of panoramic image test body of Dagangshan dam bedrock

孔深/m	Ⅱ类花岗岩(12个月)		Ⅲ ₂ 类花岗岩(13个月)		Ⅲ ₁ 类辉绿岩(7个月)	
	开度比	数量比	开度比	数量比	开度比	数量比
0.0~2.0	3.0	1.25	1.4	1.15	/	/
2.0~4.0	2.6	1.0	1.3	1.12	/	/

续表6

孔深/m	Ⅱ类花岗岩(12个月)		Ⅲ ₂ 类花岗岩(13个月)		Ⅲ ₁ 类辉绿岩(7个月)	
	开度比	数量比	开度比	数量比	开度比	数量比
4.0~6.0	2.2	1.25	1.25	1.08	/	/
6.0~8.0	1.9	1.25	1.2	1.05	/	/
8.0~10.0	1.6	1.2	1.05	1.0	1.4	2.5
10.0~12.0	1.3	1.05	1.0	1.05	1.2	2.2
12.0~14.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.1	2.0
14.0~16.0	1.1	1.0	/	/	1.05	1.5
16.0~18.0	1.0	1.0	/	/	/	/
18.0~20.0	1.0	1.0	/	/	/	/

注:表中“/”表示无该孔段的测试数据。

5 卸荷松弛效应工程特性分析

5.1 卸荷松弛效应与岩体建造的关系

坝基花岗岩体约为7亿年前晋宁—澄江期成陆造山运动晚期碰撞造山阶段至陆缘裂谷发育阶段的减压增温过程的一种岩浆产物,具中粒不等粒花岗结构,局部见微文象结构,块状构造。基性辉绿岩脉具有多期贯入特征,其形成的主要时期应在海西末期—印支早期,具有典型的辉绿结构,块状构造。岩体的建造是坝基开挖松弛时空效应的物质基础。综合分析大岗山的花岗岩及辉绿岩声波波速和全景图像测试等资料可知,坝基岩体卸荷松弛均具有不同程度的时空效应,其中辉绿岩卸荷松弛效应普遍强于花岗岩。

5.2 卸荷松弛效应与岩性的关系

由前述坝基岩体声波测试结果及全景图像特征可以看出,花岗岩在长观初期和末期的波速衰减率都小于辉绿岩,辉绿岩卸荷松弛的时间、空间效应更强,衰减时间更长,卸荷松弛效应辉绿岩强于花岗岩,这是由其岩性本属性决定的。

坝区辉绿岩和花岗岩遭受了多期次的蚀变作用,蚀变产生了绿泥石、伊利石等粘土矿物。辉绿岩在蚀变中相对于花岗岩生成了更多的粘土矿物,大大削弱了坝基岩体的物理力学性质,使其卸荷松弛过程中具有比花岗岩更强的时空效应。蚀变产生的粘土矿物和卸荷松弛岩体中隐微裂隙显现及

新生裂隙等构成了坝基岩体卸荷松弛时空效应的物质基础。

5.3 卸荷松弛效应与岩类的关系

岩体质量的差异,意味着岩体中节理裂隙数量、长度和张开度等差异。岩体质量的下降,意味着岩体中节理数量的增加,贯通长度和张开度增大等一系列弱化岩体质量的特征,弱化岩体的物理力学性质。岩体质量较差,其物理力学性质强度也较低,在开挖卸荷松弛中,更易产生新的节理裂隙,原有的节理裂隙也易被拉开张宽,导致波速衰减较大,更易产生变形,变形时间较长,具有较长的时间效应。

岩体质量越差,其波速衰减率越高,岩体流变性能越强,流变趋于收敛时间越长。因此,岩体质量越差,其时间效应较强,空间效应较弱。

6 结论

(1)坝基岩体卸荷松弛宏观特征明显,其变形松弛现象主要有如下几种:“葱皮”和“板裂”、沿原有结构面的松弛开裂、块体松弛、辉绿岩脉整体松弛、沿平缓结构面的位错、爆破松弛等。按坝基岩体开挖卸荷松弛的成因可将坝基岩体松弛分为卸荷回弹、结构松弛、爆破松弛3种类型。

(2)岩体在变形破坏过程中,一方面岩体的内部结构和外形不断发生变化,另一方面其应力状态也随之不断调整,并引起弹性能积存与释放效应。

不同大小的压应力将在岩体中产生不同的剪应力及拉应力,从而导致岩体破坏。根据岩体的平均波速及波速衰减率,同时结合钻孔全景图像的裂隙开度情况及波速曲线特征,坝基岩体松弛带可分为强松弛带、弱松弛带及基本正常带。

(3)坝基岩体开挖卸荷松弛具有明显的时间、空间效应。时间效应主要表现为随着观测周期延长,岩体声波速度减小,波速总衰减率增加,岩体裂隙数量及张开度增加。空间效应主要表现为随着深度的增加,波速衰减率减小,岩体裂隙数量及张开度减少。

(4)辉绿岩在蚀变中相对于花岗岩生成了更多的粘土矿物,大大削弱了岩体的物理力学性质,使其卸荷松弛过程中具有比花岗岩更强的时空效应。

(5)岩体卸荷松弛效应与岩体质量有着密切关系。岩体质量越差,其波速衰减率越高,岩体抗流变性能越弱,流变性能越强,流变趋于收敛时间越长,其时间效应较强,空间效应较弱。

(6)鉴于坝基岩体具有一定的卸荷松弛特性,在基础处理上需根据岩体的地质特性采取加强固结灌浆、局部混凝土置换等综合处理措施;对坝基岩体开展声波波速、变形、应力等长期监测,以动态掌握坝基岩体开挖松弛、坝体自重压密特性等。

参考文献(References)

- [1] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院.四川省大渡河大岗山水电站可行性研究报告[R].成都,2006. (Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute. Feasibility study report of Dagangshan Hydropower Station in Dadu River, Sichuan [R]. Chengdu, 2006. (in Chinese))
- [2] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院.四川省大渡河大岗山水电站建基岩体工程地质条件及评价[R].成都,2011. (Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute. Engineering geological conditions and evaluation of foundation rock mass of Dagangshan Hydropower Station in Dadu River, Sichuan [R]. Chengdu, 2011. (in Chinese))
- [3] 陆兆溱.工程地质学[M].北京:中国水利水电出版社,2001. (Lu Zhaozhen. Engineering geology [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2001 (in Chinese))
- [4] 蔡斌,朱可俊,刘畅.大岗山水电站坝基岩体表层卸荷松弛带特征分析[J].水电站设计,2014,30(4):20-23. (Cai Bin, Zhu Kejun, Liu Chang. Analysis of the characteristics of the unloading and relaxation zones in the dam base rock mass of Dagangshan Hydropower Station [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2014, 30(4):20-23. (in Chinese))
- [5] 赵勇.大渡河大岗山水电站建基岩体开挖卸荷松弛特征研究[D].成都:成都理工大学,2012. (Zhao Yong. Analysis of the characteristics of the unloading and relaxation zones in the dam base rock mass of Dagangshan Hydropower Station [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [6] 冯学敏.高坝建基面开挖卸荷松弛分析及启示[J].水电站设计,2010,26(1):1-7. (Feng Xuemin. Analysis of unloading relaxation in the excavation of high dam foundation and the enlightenment [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2010, 26(1):1-7. (in Chinese))
- [7] 徐志英.岩石力学[M].北京:水利电力出版社,1981. (Xu Zhiying. Rock mechanics [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1981. (in Chinese))
- [8] 陈星,黄坚,冷云,等.拉剪应力作用下裂隙岩体动态损伤演化[J].西北水电,2010(4):17-20. (Chen Xing, Huang Jian, Leng Yun, et al. Dynamic damage evolution of fractured rock mass under tensile and shear stress [J]. Northwest Hydropower, 2010(4):17-20. (in Chinese))
- [9] 易毅,汤子坚,张春安.大岗山水电站坝基岩体表层低波速带成因分析[J].人民长江,2014,45(22):37-53. (Yi Yi, Tang Zijian, Zhang Chunan. Causal analysis for low wave-velocity zone at dam foundation of Dagangshan Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2014,45(22):37-53. (in Chinese))
- [10] 李文纲,王仁坤,贺如平,等.岩体流变力学特性与工程稳定性[M].北京:中国水利水电出版社,2016. (Li Wengang, Wang Renkun, He Ruping, et al. Rheological mechanical properties and engineering stability of rock mass [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2016. (in Chinese))