

水库输水隧洞施工爆破振动对大坝安全 影响监测及分析^①

刘超英, 葛双成

(浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要: 阐述柏峰水库除险加固工程主坝输水隧洞施工爆破振动对大坝安全影响。选择有代表性的几个部位, 采用原位质点振动速度测试的方法对整个施工期间爆破振动对大坝安全影响进行全过程监测与分析。对实测结果分析表明, 爆破振动对大坝安全未产生明显的危害。监测成果可为工程爆破振动安全评价提供科学依据。

关键词: 水库输水隧洞; 爆破振动; 质点振动速度; 频谱分析; 大坝安全监测

中图分类号: TV651.1

文献标志码: B

文章编号: 1000-0844(2015)02-0367-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0367

Impacts of Vibration From Blasting on Dam Safety in the Baifeng Reservoir Water Conveyance Tunnel

LIU Chao-ying, GE Shuang-cheng

(Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou, Zhejiang 310020, China)

Abstract: Vibration from blasting for construction of a water conveyance tunnel at the Baifeng Reservoir main dam has potential effects on dam safety. In order to ensure the safety of the dam during blasting for the main dam water conveyance tunnel, blasting vibration must be monitored. By analyzing particle vibrating velocity, the effects of blasting vibration on the dam were monitored. Vibrations during four blasting events were monitored. Correlative data was collected using a TC-4850 vibrometer and a 3-component TYTEST velocity sensor. The response and characteristics of vibration from construction blasting were analyzed based on the data from three directions at each measuring point. Measurements included vibration history, peak, and frequency spectrum analysis. Results of the peak analysis showed that the maximum vibration velocity at each measuring point was less than 1.0 cm/s. This satisfied the design requirements for the control of blasting vibration velocity. The maximum vertical and horizontal displacements at each measuring point were within 0.013 mm. The maximum vertical and horizontal accelerations at each measuring point were within 2.559 m/s^2 . Results of the frequency spectrum analysis showed that the vertical and horizontal vibration frequency corresponding to maximum peaks on the Fourier spectrum were in the range of 14.71~34.0 Hz. This range of frequency response was outside the natural response frequency of dam structure, which did not experience the effects of resonance. Compared with the particle vibration velocity of the dam's foundation, the particle vibration velocity at the top of the dam structure was amplified. Therefore, the particle vibration velocity at the dam foundation was less than that at the top of the dam, and consequently, under the threshold at which se-

① 收稿日期: 2014-08-20

作者简介: 刘超英(1958—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水工结构及岩土工程研究. E-mail: lcy5899@sina.com

curity controls at the dam's foundation would be triggered. All of the analyses demonstrated that blasting vibration associated with construction of the conveyance tunnel had no significant effects on dam safety and stability.

Key words: reservoir water conveyance tunnel; blasting vibration; particle vibration velocity; frequency spectrum analysis; dam safety monitoring

0 引言

柏峰水库位于浙江省义乌市赤岸镇柏峰村,是一座以灌溉、供水为主,结合防洪等综合利用的中型水库。柏峰水库除险加固工程主坝输水隧洞进水口布置在距离原右岸隧洞上游 30 m 处,隧洞出口位于大坝下游坝脚 60 m 处,隧洞全长 208 m。隧洞采用塔式进水口,分别取水的方式,隧洞进水口底高程 93.00 m,分别取水闸门孔口尺寸均为 $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$,检修平台高程为 122.80 m,启闭平台高程为 128.00 m。隧洞闸门井后设 5.5 m 渐变段。隧洞开挖洞径 2.6 m,衬后洞径 2.0 m,隧洞全段采用 C25 混凝土衬砌,隧洞出口布置供水设施。

柏峰水库主坝为黏土心墙砂壳坝,该水库除险加固工程主坝输水隧洞施工爆破时,爆破源距离水库大坝较近,因此存在施工爆破振动对大坝的安全影响问题。由于爆区距离大坝需保护物较近,不可避免会产生较大爆破振动效应影响,对大坝来说还存在爆破地震作用下的动力响应问题。因此,为了保证水库主坝输水隧洞工程施工爆破时大坝的安全,必须对大坝进行爆破振动监测以进行安全评价^[1-2]。

1 爆破参数及监测总布置

1.1 爆破参数

(1) 第一次爆破振动监测

爆源位置为主坝输水隧洞出口,出口点高程 86.07 m。爆破方式为浅孔爆破,炸药类型为 2 号岩石乳化炸药。最大单响药量为 0.9 kg,总药量为 4.95 kg,全段装药。

(2) 第二次爆破振动监测

爆源位置为主坝输水隧洞桩号 0+195.04 处,高程为 86.92 m。爆破方式为浅孔爆破,炸药类型为 $\Phi 32\text{ mm}$ 、150 g 乳化炸药。总孔数为 25 孔,平均单孔药量为 1.038 kg,最大单响药量为 1.8 kg,总药量为 25.95 kg。雷管段数为 7 段,延迟时间为 7 ms。

(3) 第三次爆破振动监测

爆源位置为主坝输水隧洞桩号 0+098.8 处,高程为 86.92 m。爆破方式为浅孔爆破,炸药类型为

$\Phi 32\text{ mm}$ 、200 g 乳化炸药。总孔数为 26 孔,平均单孔药量为 1 kg,最大单响药量为 2 kg,总药量为 26 kg。雷管段数为 7 段,延迟时间为 7 ms。

(4) 第四次爆破振动监测

爆源位置为主坝输水隧洞桩号 0—001.085 处,高程为 93.80 m。爆破方式为浅孔爆破,炸药类型为 $\Phi 32\text{ mm}$ 、200 g 乳化炸药; $\Phi 32\text{ mm}$ 、150 g 膨化炸药。平均单孔药量为 0.8 kg,最大单响药量为 1.5 kg,总药量为 20 kg。雷管段数为 1、3、5、7、9、11 段,延时为 2 ms,总孔数为 25 孔。

1.2 监测系统及设备

采用 TC-4850 爆破测振仪和 TYTEST 型 3 分量高灵敏度速度传感器,监测人工爆破过程瞬态爆破振动。该系统传感器工作频带范围 2~500 Hz,系统记录器内置数码芯片自动对测试过程进行控制,可灵活方便设置测试参数,包括测试量程、采样频率、信号触发方式及电平大小,记录时间及次数等^[3]。

1.3 监测点布置

根据爆破振动监测目的和要求,每次爆破振动监测中布置 3 个监测点。其中,测点 1 位于右岸岸墙顶面(桩号大坝 0+221.24,高程 126.21 m,混凝土面),测点 2 位于右岸混凝土防渗墙顶面(桩号大坝 0+210.72,高程 126.20 m,混凝土面),测点 1 与测点 2 在同一直线上即防渗墙中心线上,并且布置在坝顶上。测点 3 位于右岸山坡岩体(桩号大坝 0+233.99,高程 126.20 m,岩石面),该测点主要了解帷幕灌浆区基岩振动情况。

2 监测成果

爆破质点振动速度监测成果见表 1。爆破质点振动傅氏谱分析结果见表 2,实测主坝输水隧洞桩号 0+098.8 处爆破 3 号测点振动速度时程曲线及傅氏谱频率分析见图 1、图 2。

从表 1 的监测结果可看出,主坝右岸岸墙、右岸混凝土防渗墙、右岸山坡岩体各测点实测最大振动速度值均在 0.40 cm/s 以内,各测点最大振动速度值均满足大坝结构体爆破振动速度控制值小于 1 cm/s 的设计要求。

表 2 中分析的岸墙、防渗墙、山坡岩体各测点振动傅氏谱第一峰频率垂直向在 15.69~33.90 Hz 之间,而水平向在 14.71~34.00 Hz 之间,远离大坝坝体自振响应频率。此外,由于结构体顶部振速通常较其基础部位有所放大,因此可以认为大坝结构体

基础等部位质点振动速度至少应与实测大坝结构体顶部振动速度处于同一数量级,即一般不会超过 0.40 cm/s,这明显低于大坝基础部位的安全控制振速,故水库主坝输水隧洞工程施工爆破不会对大坝的安全与稳定产生危害影响。

表 1 柏峰水库主坝输水隧洞施工爆破振动速度监测结果

Table 1 Monitoring results of vibration velocity from construction blasting in main dam water conveyance tunnel of Baifeng reservoir											
爆源位置	监测部位	测点编号	高程/m	水平距离/m	高差/m	水平径向振动		水平切向振动		垂直向振动	
						最大振动速度 /(cm·s ⁻¹)	主振频率/Hz	最大振动速度 /(cm·s ⁻¹)	主振频率/Hz	最大振动速度 /(cm·s ⁻¹)	主振频率/Hz
主坝输水隧洞出口	右岸岸墙	1	126.21	114.64	40.14	0.038	32.90	0.038	66.67	0.079	108.70
	右岸防渗墙	2	126.20	116.00	40.13	<0.05 仪器未触发	-	<0.05 仪器未触发	-	<0.05 仪器未触发	-
	右岸山坡岩体	3	126.59	116.05	40.52	0.048	208.33	0.039	59.52	0.093	217.39
主坝输水隧洞桩号 0+195.04	右岸岸墙	1	126.21	104.62	39.29	0.026	68.49	0.036	83.33	0.082	86.21
	右岸防渗墙	2	126.20	106.39	39.28	<0.05 仪器未触发	-	<0.05 仪器未触发	-	<0.05 仪器未触发	-
	右岸山坡岩体	3	126.59	105.93	39.67	0.051	192.31	0.043	78.12	0.136	222.27
主坝输水隧洞桩号 0+098.8	右岸岸墙	1	126.21	40.26	35.55	0.105	51.02	0.066	72.46	0.369	96.15
	右岸防渗墙	2	126.20	50.43	35.54	0.050	26.32	0.052	39.37	0.112	111.11
	右岸山坡岩体	3	126.59	38.32	35.93	0.148	116.28	0.144	166.67	0.324	217.39
主坝输水隧洞桩号 0-001.085	右岸岸墙	1	126.21	77.40	32.41	0.125	22.12	0.124	29.94	0.210	50.55
	右岸防渗墙	2	126.20	80.23	32.40	0.096	21.74	0.086	39.37	0.111	19.23
	右岸山坡岩体	3	126.59	75.34	32.79	0.097	21.83	0.113	19.53	0.136	21.10

表 2 柏峰水库主坝输水隧洞施工爆破质点振动傅氏谱分析结果

Table 2 Fourier spectrum analysis results of particle vibration from construction blasting in main dam water conveyance tunnel of Baifeng reservoir

爆源位置	监测部位	测点编号	水平径向		水平切向		垂直向	
			第一峰频率/Hz	第二峰频率/Hz	第一峰频率/Hz	第二峰频率/Hz	第一峰频率/Hz	第二峰频率/Hz
主坝输水隧洞出口	右岸岸墙	1	27.16	53.63	25.50	52.64	27.35	51.99
	右岸山坡岩体	3	32.51	52.61	33.04	53.14	32.81	53.88
主坝输水隧洞桩号 0+195.04	右岸岸墙	1	22.71	68.67	23.18	67.22	24.25	64.82
	右岸山坡岩体	3	14.71	33.45	15.19	33.41	15.69	35.69
主坝输水隧洞桩号 0+098.8	右岸岸墙	1	34.00	58.00	33.63	58.74	33.90	57.63
	右岸防渗墙	2	29.04	62.84	26.31	63.02	30.33	64.26
	右岸山坡岩体	3	33.41	58.50	30.87	60.71	31.14	57.62
主坝输水隧洞桩号 0-001.085	右岸岸墙	1	28.97	69.29	28.06	70.19	19.08	29.20
	右岸防渗墙	2	23.84	95.66	21.86	94.88	21.64	92.92
	右岸山坡岩体	3	22.00	68.53	22.74	66.21	24.89	67.78

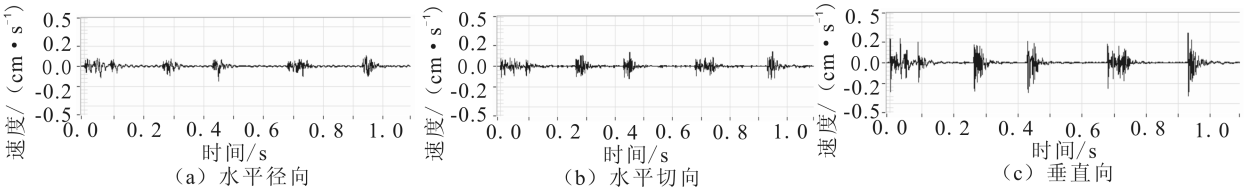


图 1 主坝输水隧洞桩号 0+098.8 处爆破 3 号测点振动速度时程曲线

Fig.1 Vibration velocity time-history curve of the 3rd measuring point from blasting in pile 0+98.8 of main dam water conveyance tunnel

3 爆破振动效应影响分析

3.1 振动历程及峰值分析^[4]

从实测振动波形来看,各测点振动持续时间垂直向在 870~1 260 ms 左右,基本没有出现结构的低频动力响应,水平向在 1 050~1 960 ms 之间,振动历程未有明显爆破振动叠加激增现象,未出现明显峰振叠加增强现象。主坝右岸岸墙、右岸混凝土防渗墙、右岸山坡岩体各测点实测最大振动速度值均在 0.40 cm/s 以内,各测点最大振动速度值均满足大坝结构体爆破振动速度控制值小于 1.0 cm/s

的设计要求。

通过爆破振动监测分析软件对实测振速波形作积分及微分变换分析,从而得到表 1 中主坝右岸岸墙、右岸混凝土防渗墙、右岸山坡岩体各测点的位移及加速度测值结果(表 3)。从表 3 可以看出,各测点产生的最大垂直向位移在 0.013 mm 以内,最大峰值加速度仅 2.559 m/s²;各测点最大水平向位移均在 0.012 mm 以内,最大峰值加速度低于 2.510 m/s²。这表明爆破自身对大坝的振动影响较小,不会对大坝安全与稳定造成危害性影响。

表 3 换算的各测点位移及加速度测值结果
Table 3 Displacement and acceleration measurements of each measuring point after converting

爆源位置	监测部位	测点编号	水平径向		水平切向		垂直向	
			峰位移/mm	峰加速度/(m·s ⁻²)	峰位移/mm	峰加速度/(m·s ⁻²)	峰位移/mm	峰加速度/(m·s ⁻²)
主坝输水隧洞出口	右岸岸墙	1	0.002	0.469	0.003	0.826	0.002	1.125
	右岸山坡岩体	3	0.001	0.736	0.003	0.991	0.003	1.435
主坝输水隧洞桩号 0+195.04	右岸岸墙	1	0.002	0.412	0.003	0.883	0.003	1.932
	右岸山坡岩体	3	0.003	0.681	0.003	0.934	0.004	2.287
主坝输水隧洞桩号 0+098.8	右岸岸墙	1	0.004	0.948	0.004	0.932	0.006	2.559
	右岸防渗墙	2	0.003	0.407	0.005	0.907	0.004	1.067
	右岸山坡岩体	3	0.004	1.934	0.003	2.510	0.004	2.545
主坝输水隧洞桩号 0-001.085	右岸岸墙	1	0.007	0.352	0.010	0.512	0.010	0.858
	右岸防渗墙	2	0.007	0.558	0.006	0.943	0.010	1.216
	右岸山坡岩体	3	0.010	0.514	0.011	1.010	0.012	1.214

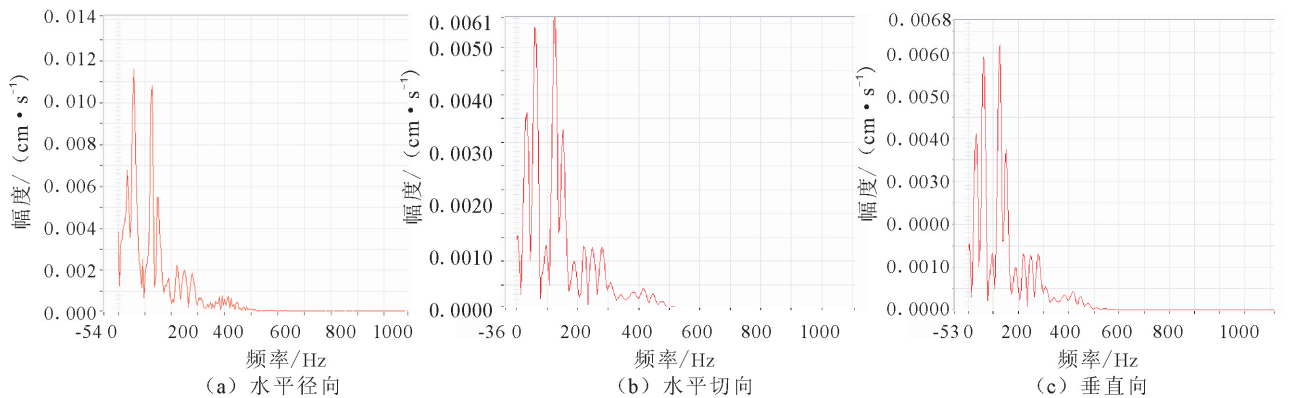


图 2 主坝输水隧洞桩号 0+098.8 处爆破 3 号测点振动频率谱分析图

Fig.2 Vibration frequency spectrum of the 3rd measuring point from diagram of blasting in pile 0+098.8 of main dam water conveyance tunnel

3.2 振动频率分析

从表 2 可见,主坝右岸岸墙、右岸混凝土防渗墙、右岸山坡岩体各测点分析的垂直向傅氏谱第一峰频率在 15.69~33.90 Hz 之间,第二峰频率在 29.20~92.92 Hz 之间,远离大坝坝体自振响应频率,这表明在垂直向大坝对爆破作用的反应很小。

而各测点分析的水平向傅氏谱第一峰频率在 14.71~34.00 Hz 之间,第二峰频率 33.45~95.66 Hz 之间,同样远离大坝坝体自振响应频率,表明在水平方向大坝对爆破作用的反应同样较小。由于爆破振动持续时间短、频率较高,具有起爆过程结束即自行消

散的特征,因而在同等振幅情况下爆破直接产生的振动影响较小。

4 结论

(1) 监测的主坝右岸岸墙、右岸混凝土防渗墙、右岸山坡岩体各测点爆破振动速度最大值均明显低于设计的爆破振动安全控制标准,爆破振动对大坝无结构性破坏作用。

(2) 采用毫秒微差导爆管联接,分段微差起爆,爆破分段清晰,未有明显爆破振动叠加激增现象,未出现明显峰振叠加增强现象。柏峰水库除险加固工程主坝输水隧洞施工爆破中采用毫秒微差浅孔爆破,优化微差起爆时间及顺序来控制爆破振动效应是合理的^[5]。

(3) 各测点爆破振动速度时程曲线及振动频谱分析表明,爆破振动频率远离爆破大坝坝体自振响应频率,坝体不会产生共振效应,爆破振动速度、加速度及位移幅值较小,振动速度最大值在 0.40 cm/s 以内,不会对大坝结构产生破坏作用。

参考文献(References)

[1] 中国工程爆破协会.爆破安全规程(GB6722-2003)[S].北京:中

国标准出版社,2004.

China Society of Engineering Blasting.Safety Regulations Blasting(GB6722-2003)[S].Beijing:China Standards Press,2004. (in Chinese)

[2] 中国电力企业联合会.水电水利工程爆破安全监测规程(DL/T5333-2005)[S].北京:中国电力出版社,2006.

China Power Business Association.Code for Blasting Safety Monitoring of Hydropower and Water Resources Engineering (DL/T5333-2005)[S]. Beijing:China Power Press,2006. (in Chinese).

[3] 李彬峰.爆破振动的分析方法及测试仪器系统探讨[J].爆破,2003,20(1):81-84.

LI Bin-feng.Discussion of Explosion Vibration Analysis Methods and Measuring and Testing Instrument System[J].Journal of Blasting,2003,20(1):81-84.(in Chinese)

[4] 霍永基.水工结构爆破震动效应研究及安全分析[J].工程爆破,2003,9(4):72-77.

HUO Yong-ji.Effect of Blasting Vibration on Hydraulic Structures and Safety Analysis[J].Journal of Blasting,2003,9(4):72-77.(in Chinese)

[5] 杨文东,范高军.龙滩水电站左岸导流洞爆破振动测试与控制研究[J].地震工程与工程振动,2008,28(4):168-172.

YANG Wen-dong ,FAN Gaoju.Study on Test and Control of Blasting Vibration of Left Spillway Tunnel at Longtan Hydropower Station[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2008,28(4):168-172.(in Chinese)