第27卷增刊
2007年12月

大地测量与地球动力学
JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS

Vol. 27 Supp.
Dec. ,2007

文章编号:1671-5942(2007)Supp. -0060-04

爆破地震波在砼重力坝中的特性反应*

刘文清[1)]　黄　仲[2)]　陈利锋[3)]

(1)长江水利委员会三峡勘测研究院,宜昌　443001
2)湖北省地震局,武汉　430071
3)长江三峡开发总公司,宜昌　443002)

摘　要　根据某大坝右岸围堰爆破,对爆破地震波三维空间的频谱、加速度、速度、动力放大倍数进行了研究,得到爆破地震波在砼重力坝的不同高度、不同方向、不同介质中的反应特性。

关键词　爆破地震波　砼重力坝　特性反应　频谱　加速度

中图分类号:P315.9　　**文献标识码**:A

CHARACTERISTIC RESPONSE OF CONCRETE GRAVITY DAM TO DEMOLITION EARTHQUAKE WAVE

Liu Wenqing[1)], Huang Zhong[2)] and Chen Lifeng[3)]

(1) *Institute of Surveying and Research of Water Conservancy Commission of Yangtze River*, *Yichang* 443001
2) *Earthquake Administration of Hubei Prouince*, *Wuhan*　430071
3) *General Corporation for Development of The Three Gorges of Yangtze River*, *Yichang*　443002)

Abstract　The spectrum, acceleration, speed and power magnification in three-dimensional space of the demolition earthquake wave from the cofferdam broken of the right bank of a great dam are studied, and the characteristic responses of different height, different direction and different medium of concrete gravity dam to the demolition earthquake waves are obtained.

Key words: demolition earthquake wave, concrete gravity dam, characteristic response, spectrum, acceleration

1　引言

世界各国十分重视大坝的抗震安全,我国在大坝抗震设计方面虽然取得了一定进展,但由于抗震理论和动力分析方法具有一定难度,许多问题还在探索之中,其理论研究方法需要实测数据进行验证。由于大坝与坝基结构的复杂性,其抗震能力不仅取决于大坝自身的坝型、规模、建材及坝基的地质条件等,同时还受地振动波(地震波)的强度和注入方向及持续时间的影响。开展大坝对爆破地震波的反应特性研究,对工程抗震设计及结构安全性设计具有十分重要的实际意义,本文依据2006年6月6日三峡大坝围堰拆除时的炮震事件对三峡大坝的频谱特征进行了分析研究。

2　测点位置与爆破点之间的距离关系

为了能完整地取得地震波在坝体内不同高程、不同介质中的传播规律、反应特性以及对坝体的影响程度等相关参数,目前国内外大多采用求质点运动的矢量和方法,即同时测量质点运动的3个正交分向量,并将它们表达成时间、频域的函数,从观测质点运动的分向量值中取其最大矢量和值作为判

* 收稿日期:2007-07-05

别对结构物造成影响程度的评价依据。为此,一般测点布设在大坝同一断面的不同高程处,本次测量时,在同一坝段共布设了 6 个测点,其中海拔高程 33 m 处的测点布设在坝体与基岩结合面上(33 m 高程以下为基岩),结合面以上测点布设在坝体内部(表 1),在每个测点处布设 3 个分向加速度拾震计,一个垂直向、两个水平向(顺河向与坝轴线垂直、横河向与坝轴线平行)。爆破点在大坝上游,海拔高程约 33 m,距大坝水平距离约 400 m,成一条直线排列。

表 1　测点位置及加速度、速度记录幅值

Tab. 1　Recorded acceleration and speed values at the measuring spots and their locations

测点编号	测点高程(m)	距炮破点直线距离(m)	加速度幅值(g)			速度(cm/s)			备注
			垂直	顺河	横河	垂直	顺河	横河	
1	-15	400.4	0.007 34	0.009 00	0.008 04	0.000 64	0.000 98	0.000 8	基岩
2	33	400.0	0.017 39	0.030 08	0.020 84	0.001 12	0.002 58	0.002 1	基岩
3	72	401.9	0.024 25	0.030 16	0.029 31	0.002 19	0.002 82	0.025 9	坝体
4	94	404.6	0.025 60	0.048 22	0.032 13	0.019 40	0.036 70	0.021 6	坝体
5	130	411.6	0.032 48	0.048 22	0.037 36	0.022 60	0.032 50	0.023 9	坝体
6	185	427.9	0.096 03	0.108 90	0.098 18	0.039 20	0.054 80	0.045 1	坝顶

3　特性分析

衡量一个较大振动事件是否对大坝构成威胁,作用在大坝上的加速度、速度反应幅值、卓越周期、持续时间等是其中较为重要的参考值,而在一定阻尼下,大坝自身对地振动效应的动力放大特性,也是大坝抗震能力的重要参量,本文主要对这些参数进行分析。

3.1　加速度、速度幅值特性

地振动的幅值是指地振动的加速度、速度和位移三者之一的峰值。地振动过程十分复杂,数学上可用空间向量(x,y,z,t)表示,其中 x,y,z 为观测点运动的空间座标位置,t 为时间,但在实际观测中,对空间的每个测点的每个分量只能由拾震器独自进行测量,因此每一条记录,只能表示一个测点在地振动时沿某一方向运动分量的时间关系,如水平向或垂直向,而在水工建筑物抗震设计中,一般只考虑水平向的地振动效应。在求水平向幅值时,从原则上讲,应该是求两个水平分量最大振幅值的矢量和,但这种做法很少,因为这种做法不易看出地振动波的驻入方向,目前普遍是将两个水平分量分别进行取样(顺河向和横河向),求各自的最大值,本次测量就是分别求取两个水平分量的最大值(表 1)。

表 1 中的各测点加速度、速度峰值是利用 PA-1 型加速度拾震器测出,从各测点测得的加速度、速度峰值可以看出以下特性:

1)加速度、速度幅值随坝高的增高而增大,随岩体向底部延伸而降低;

2)各分向之间的关系为顺河向大于横河向,而横河向大于垂直向,所以地震波的驻入方向(顺河向)给建筑物造成的地振动效应比其它分向明显。

3.2　频谱特性

1)傅里叶谱

在进行频谱分析时,为了弄清这次爆破地震波的频率成份,对振动波形用傅里叶级数进行展开,即:

$$x(t)=a_0+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos nat+b_n\sin nat)=\sum_{n=0}^{\infty}(a_n\cos nat+b_n\sin nat) \tag{1}$$

并按式(2)、(3)、(4)求出相应系数的平均值,即:

$$a_0=\frac{1}{T}\int_0^T x(t)\,\mathrm{d}t=x(t) \tag{2}$$

$$a_n=\frac{1}{T}\int_0^T x(t)\cos nat\,\mathrm{d}t=x(t) \tag{3}$$

$$b_x=\frac{1}{T}\int_0^T x(t)\sin at\,\mathrm{d}t=x(t) \tag{4}$$

傅里叶级数的频谱幅值为

$$An=\sqrt{a_n^2+b_n^2} \tag{5}$$

傅里叶级数的频谱相位角为

$$\varphi_n=\arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \tag{6}$$

傅里叶正变换定义为

$$x(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}x(t)\,\mathrm{e}^{jdt}\,\mathrm{d}t=x(t) \tag{7}$$

经变换后的傅里叶频谱如图 1 ~2 所示,表 2 是这次爆破事件的反应谱幅值、主频及动力特性分析结果。

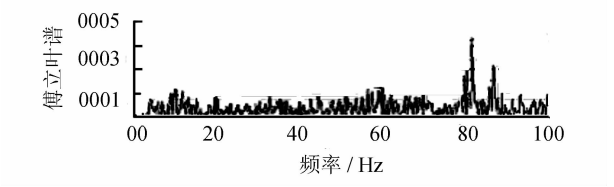


图 1 185 m 高程测点(坝顶)幅频特性

Fig. 1 Amplitude and frequency features at elevation of 185 m(on top of the dam)

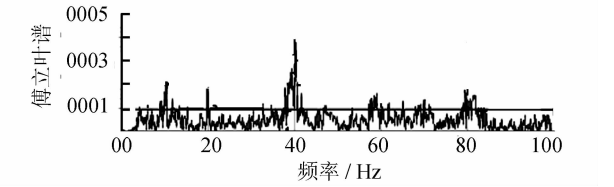


图 2 -15 m 高程测点(基岩)幅频特性

Fig. 2 Amplitude and frequency features at elevation of -15 m(on bedrock)

表 2 各测点的动力放大倍数、反应谱及主频

Tab. 2 Dynamic amplification, response spectrum and principle frequency of each point

测点编号	测点高程(m)	放大倍率 β			反应谱(g)			主频(Hz)		
		垂直	顺河	横河	垂直	顺河	横河	垂直	顺河	横河
1	-15	0.4	0.3	0.4	0.003	0.003	0.003	40.6	44.0	42.6
2	33	0.9	1.2	1.1	0.016	0.036	0.023	57.2	54.2	57.1
3	72	1.2	1.5	1.4	0.029	0.045	0.041	59.0	61.8	61.8
4	94	1.2	1.6	1.3	0.031	0.077	0.042	63.7	62.9	62.4
5	130	1.4	1.7	1.5	0.045	0.082	0.056	65.3	63.5	63.3
6	185	3.2	3.6	3.4	0.307	0.392	0.334	82.2	64.3	65.2

从表 2 中的频谱分析结果可以看出,大坝对爆破地震波在频域方面的反应具有以下特性:

1)卓越频率较高。通过谱分析,同一坝段各测点处的卓越频率都超过了 40 Hz(40 ~ 85 Hz),并在 33 ~ 185 m 测点之间,多数主频出现在 55 ~ 65 Hz 之间;

2)信息丰富,频带较宽。从付氏变换后的频谱发现,从 0 ~ 100 Hz 频带范围内,都有不同强度的振动信息存在,只是低频部分反应较弱,高频部分反应较强,低频部分的幅值只有卓越周期处幅度的 2/5;

3)卓越频率随测点高程的增高而增大。从表 2 中可以看出,6 个测点 18 个分量的卓越频率依次从 -15 m 测点的 40.6 Hz 递增至 185m 测点的 82.2 Hz,从而说明坝体的高程与卓越频率的高低存在一定联系。

3.3 动力放大特性

地振动时,大坝的动力反应十分复杂,这不仅是因为水工建筑物自身的结构和边界条件很复杂,在分析时原则上应考虑库水、地基和坝体三者间的互相作用,并将坝体、库水及地基三者作为一个综合振动体系来进行动力分析,作有限元法求解,但这种求解法存在许多困难,如地基及边界如何确定,库水与坝体的接触面如何处理等等。为了避免这种求解困难,同时也能清楚阐明库水和地基各项因素影响,通常的做法是将库水和地基的影响视为作用在坝体迎水面基础上的外力,其在坝体作用力结果视同地振动过程一并发生。大坝的动力特性如果从物理学上来讲,主要与自振频率、振型、阻尼比 3 个参数有关,不同类型坝体的阻尼、自振频率,其特性表现各不相同,根据前面的分析,能代表混凝土重力坝动力特性的阻尼应比在 0.5 附近比较准确,所以本次研究的动力放大特性是在阻尼比 0.5 的条件下进行的,理论计算方法如下:

$$\beta = \left| \frac{[\ddot{x}(t) + a(t)]_{\max}}{[a(t)]_{\max}} \right| \tag{8}$$

式(8)中,$[\ddot{x}(t) + a(t)]_{\max}$是绝对加速度反应谱,$[a(t)]_{\max}$是地震加速度计记录的最大值。根据式(8)计算得出各测点及分量的动力放大倍数如表 2 所示。从表 2 可以看出,从 -15 m 测点至 185 m 测点的动力放大倍数都在混凝土大坝安全阀值 5 倍以内,并具有以下特性:坝体中间部分(从 33 m 至 130 m)虽然随坝体高程的增高,放大倍数有增大趋势,但并不明显(图 3),而从坝基与坝体结合面(33 m 处)向基岩底部延伸至 -15 测点处的放大倍数降低

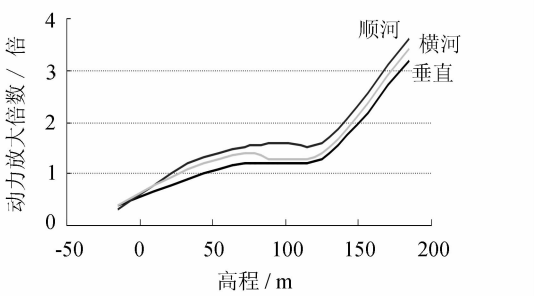


图 3 动力放大倍数与高程之间的变化曲线

Fig. 3 Change curves of the relationship between dynamic amplification and elevation

较为明显,从而说明混凝土重力坝的坝体本身对爆破地震波动力放大能力较低,对一定程度的地振动有较强的吸收作用。

4　结论

1)爆破地震波在大坝中从低处向高处传播时,加速度、速度幅值逐渐增大,说明建筑物随高度对地震波幅值有放大效应,而且坝顶的放大效应最强;

2)随着坝体的增高,其主频也逐渐升高,主频出现在 40 ~ 83 Hz 范围内;

3)大坝对地震动波的驻入方向反应比较敏感,同向幅值较大(本文中顺河向为同向),异向较小。

参　考　文　献

1　张奇,白春华,刘庆明. 爆炸地震波频谱特性研究[J]. 北京理工大学学报,1999,3:307 ~ 309.

2　王钟琦,等. 岩土工程测试技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.

3　杨桂通. 弹塑性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980.

4　霍永基, 王湘钧, 费骥鸣. 爆破地震波谱分析及其应用研究[M]. 北京: 水利水电出版社, 1984.

(上接第 59 页)

2) 操作简单方便。很大程度上提高了观测的可操作性,测量不受时间限制,同时对观测环境要求较低;

3) 可减轻劳动强度,提高工作效率。

参　考　文　献

1　中国地震局. 地震及前兆数字观测技术规范[M]. 北京: 地震出版社,2001.

2　吕永清,等. 地震仪器定向与磁偏角[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(2):120 ~ 123.

3　周忠谟,等. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,2004.