

“5.12”汶川大地震时冶勒大坝实测动力反应

熊 堃, 何蕴龙, 张艳锋

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 2008年5月12日14时28分四川汶川发生M8.0级大地震, 冶勒大坝距震中汶川约258公里, 具有强烈震感, 大坝的强震监测台阵对此次大地震有较完整的有效数据记录。针对这些实测地震记录, 采用时程分析方法和频谱分析方法分析大坝的地震反应特征和规律, 并结合其它监测资料, 考察了此次大地震对冶勒大坝所产生的影响, 认为冶勒大坝在震后运行性态稳定, 情况基本正常。此外, 将此次地震记录与以往监测的地震记录进行对比分析, 获得了冶勒大坝与一般土石坝不同的地震动力反应规律, 这种特殊规律与冶勒大坝特殊的地质条件密切相关。

关键词: 冶勒大坝; 汶川地震; 监测; 动力反应

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2008)10-1575-06

作者简介: 熊 堃(1984-), 男, 湖北谷城人, 博士研究生, 从事水工结构研究。E-mail: lynnxiong@163.com。

Recorded seismic response of Yele Dam during “5.12” Wenchuan Earthquake

XIONG Kun, HE Yun-long, ZHANG Yan-feng

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A disastrous M8.0 earthquake happened in Wenchuan, Sichuan Province at 14:28 on May 12, 2008. The Yele Dam site was shocked strongly at an epicentral distance of about 258 kilometers. The monitoring station on the dam obtained comparatively complete records of “5.12” Wenchuan Earthquake. Based on the earthquake records of Yele Dam, its seismic response were analyzed by use of the time history method and the spectral analysis method. Combined with the analysis of monitored data of other earthquakes, the effects of the Wenchuan Earthquake on Yele Dam was studied. It was concluded that Yele Dam remained in normal working state after the great Earthquake. Moreover, through the contrastive analysis of dynamic response between “5.12” Wenchuan earthquake and the previous ones, some distinct seismic response laws of Yele Dam were acquired, and they were closely associated with its peculiar geological condition.

Key words: Yele Dam; “5.12” Wenchuan Earthquake; monitoring; seismic response

0 前 言

2008年5月12日14时28分四川汶川发生M8.0级大地震, 此次大地震发生在青藏高原的东南边缘、川西龙门山的中心, 位于汶川—茂汶大断裂带上, 全国大部分省市均受波及, 冶勒大坝距震中汶川两百多公里, 具有强烈震感。冶勒水电站位于安宁河活动断裂带的北段, 库区距下游安宁河活动裂西支约2 km, 属外围强震波及区。经四川省地震局鉴定, 冶勒水电站库坝区地震基本烈度为Ⅷ度, 地震设计烈度Ⅸ度, 设计地震加速度值高达0.45g。其地质构造背景十分复杂, 超常规的地质现象较为突出。坝址处于冶勒断陷盆地边缘, 坝基左岸基岩埋藏较浅、产状陡倾河心及下游, 河床及右岸地表覆盖层深厚, 该套深厚覆盖地层由第四系中、上更新统卵砾石层、粉质壤土和块碎石土等组成, 属冰水河湖相沉积层, 在不同地质历史时期里经受了不同程度的泥钙质胶结和超固结压密作

用, 成份复杂, 变形不均, 因此造成了坝基左、右岸基础严重不对称, 基础变形协调及防渗处理难度极大。

拦河大坝采用沥青混凝土心墙堆石坝, 最大坝高124.5 m, 在同类坝型国内最高、世界第三, 仅次于土耳其139 m高的Kopru坝和挪威128 m高的Storglomvatn坝。右坝肩基础防渗总深度超200 m, 其中防渗墙深度达140 m, 墙体分上、下两层施工, 上层墙、下层墙之间通过钢筋混凝土廊道连接, 下层防渗墙底以下续接60余米深的灌浆帷幕, 帷幕孔最大深度约120 m。

汶川地震前大坝强震监测台阵成功取得强震记录11次, 已初步获得大坝在运行中的地震动力反应规律。2008年5月12日, 监测台阵获取“5.12”汶川M8.0级大地震记录数据, 本文通过对此次实测地震数

据记录进行分析,结合巡视检查和其它监测资料,分析大坝在地震中实际的动力反应情况,并考察了5.12汶川大地震对冶勒大坝工作性态所产生的影响,为大坝抗震安全性评价提供依据。

1 冶勒大坝强震监测设计

1.1 强震仪类型

本工程使用的是中国地震局哈尔滨工程力学研究所生产的GDQJ-I和GDQJ-II型固态地震动强度记录仪。当有感地震发生时,仪器自动触发、记录、计算其烈度。所记录的数据分EW,SN,UP3个方向,EW方向上以向东运动为正,SN方向上以向北运动为正,UP方向上以向上运动为正。

固态地震动强度记录仪的关键参数:通道数为3;采样率为200 sps;通道延迟为0 μ s;动态范围为90 db(GDQJ-II型为120 db);转换精度为16 bit(GDQJ-II型为24 bit);记录器满量程为 ± 2.5 V(最大 $\pm 2g$);灵敏度为1 LSB。

传感器SLJ-100三分向力平衡加速度计关键参数:测量范围为 $\pm 2g$;灵敏度为 ± 1.25 V/g;动态范围为 > 120 db;噪声为 < 125 μ V;频带为0~80 Hz。

1.2 强震仪布置

按照大坝的强震仪布置原则^[1],冶勒大坝强震监测台阵的9台强震仪基本沿大坝坝顶和最大断面布置,图1显示了在大坝最大剖面上强震仪的布置,图2显示了强震仪的平面布置情况。其中#1, #4, #5, #6, #7和#10观测房的强震仪主要监测主坝表面的地震反应,灌浆平洞强震仪监测左岸基岩的地震情况, #11观测房强震仪监测右岸副坝的地震反应,由于大坝的沥青混凝土心墙很薄,在监测廊道内的最大断面位置布置一台强震仪以监测心墙附近的地震反应情况。

另外,由于冶勒大坝坝轴线正好为南北向,因此强震记录的EW向即为大坝顺河向,SN向即为大坝的横河向,UP为竖直向。

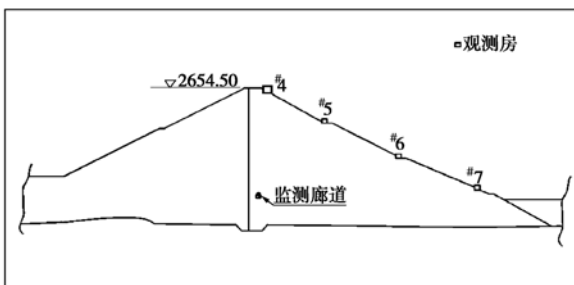


图1 冶勒大坝最大剖面强震仪布置图

Fig. 1 The placement of strong-motion instruments on the largest section of Yele Dam

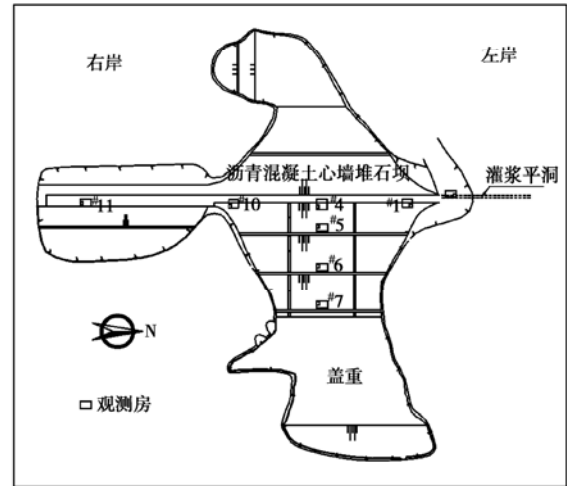


图2 冶勒大坝强震仪平面布置图

Fig. 2 The arrangement of strong-motion instruments

2 强震资料的分析方法

对于强震监测台阵所取得的地震记录,首先对原始记录进行“基线校正”和滤波处理。然后分别由地震加速度记录一次、二次积分获得坝体各部位地震速度和位移的时程曲线。再通过快速傅立叶变换,将强震记录曲线时域信号转换为傅立叶谱,以分析加速度过程的频率成分,分析各部位加速度主振频率等频域特征反应量^[2]。

3 “5.12”汶川大地震监测分析

地震发生后,监测台阵工作人员迅速进行了数据采集,除维修中的3台以外,共有5台强震仪获得“5.12”汶川大地震以及数次余震记录,以下只针对主震作详细分析。

3.1 地震记录情况

结合中国地震台网中心所公布的地震目录,冶勒大坝强震监测台阵在“5.12”汶川大地震期间所记录各次地震基本要素如表1所示,其中第一次地震记录即是此次“5.12”汶川大地震的主震。

3.2 “5.12”汶川大地震时域分析

图3显示了主震中位于基岩上的左岸灌浆平洞强震仪与最大剖面的坝顶#4观测房强震仪所记录的校正后三向加速度时程曲线。对于主震,经校正处理后,其加速度波形清晰,持续时间长,若以地震历中,加速度绝对值第一次与最后一次出现 $|A(t)| > k|A_{max}|$ 的时间差定义为地震持续时间,其中 k 取0.2, A_{max} 为加速度峰值,则大坝左岸基岩记录的持续时间约为106 s,主坝最大剖面坝顶记录的持续时间为195 s,可知此次大地震具有较强破坏性。

表 1 “5.12” 汶川大地震主震及余震的基本要素表

Table 1 The essentials of records during “5.12” Wenchuan Earthquake

地震编号	地震日期	发震时刻	震级 Ms	震中位置		震中距 /km	震源深度 /km
				北纬	东经		
1	2008-05-12	14:28:04	8.0	31°00'	103°24'	258	14
2	2008-05-12	14:43:15	6.0	31°00'	103°30'	262	33
3	2008-05-12	15:34:47	5.0	31°00'	103°30'	262	10
4	2008-05-12	19:10:58	6.0	31°24'	103°36'	306	33
5	2008-05-12	21:40:54	5.1	31°00'	103°30'	262	33
6	2008-05-13	15:07:11	6.1	31°54'	103°24'	351	33
7	2008-05-25	16:21:02	6.4	32°36'	105°24'	454	33

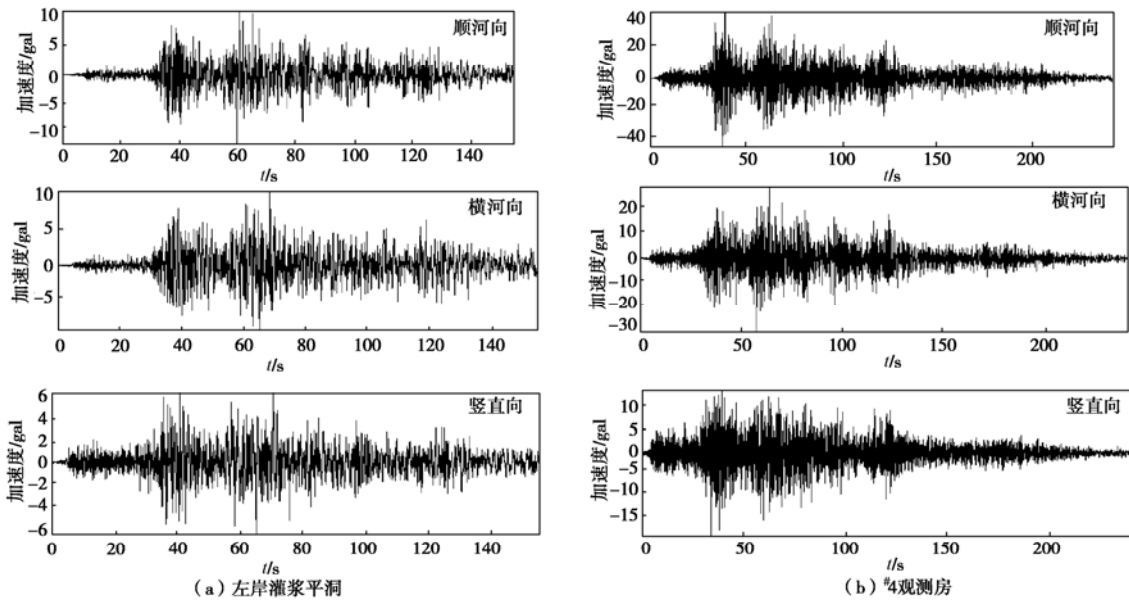


图 3 “5.12” 汶川大地震大坝顺河向、横河向和竖直向加速度时程图

Fig. 3 Time histories of acceleration in transverse, longitudinal and vertical directions during “5.12” Wenchuan Earthquake

表 2 “5.12” 汶川大地震大坝各部位加速度、速度及位移峰值

Table 2 The peak values of acceleration, velocity and displacement during “5.12” Wenchuan Earthquake

测站	分项	最大加速度	最大速度	最大位移	测站	分项	最大加速度	最大速度	最大位移
		$/(cm \cdot s^{-2})$	$/(cm \cdot s^{-1})$	/cm			$/(cm \cdot s^{-2})$	$/(cm \cdot s^{-1})$	/cm
#4	顺河向	-43.995	2.951	-0.844	灌浆平洞	顺河向	-11.877	1.733	1.643
	横河向	-30.642	-2.271	0.791		横河向	10.310	-1.638	1.133
	竖直向	-19.586	1.489	-0.452		竖直向	-7.206	1.240	-1.457
#5	顺河向	27.448	2.388	1.679	监测廊道	顺河向	14.078	1.913	-1.626
	横河向	22.828	2.295	0.875		横河向	14.912	-1.642	-0.800
	竖直向	-27.116	1.378	-0.833		竖直向	9.120	1.116	-0.816
#7	顺河向	-35.008	2.100	1.712					
	横河向	25.102	2.188	0.846					
	竖直向	21.000	-1.286	-0.826					

表 2 列出了大坝各部位在地震中的加速度、速度和位移峰值。因数据量大，以下文中仅给出左岸灌浆平洞与大坝主坝坝顶的地震时程记录。图 4 显示了主

震中左岸灌浆平洞强震仪与坝顶#4 观测房强震仪所记录的地震顺河向、横河向及竖直向加速度校正处理后积分所得到的速度、位移时程曲线。

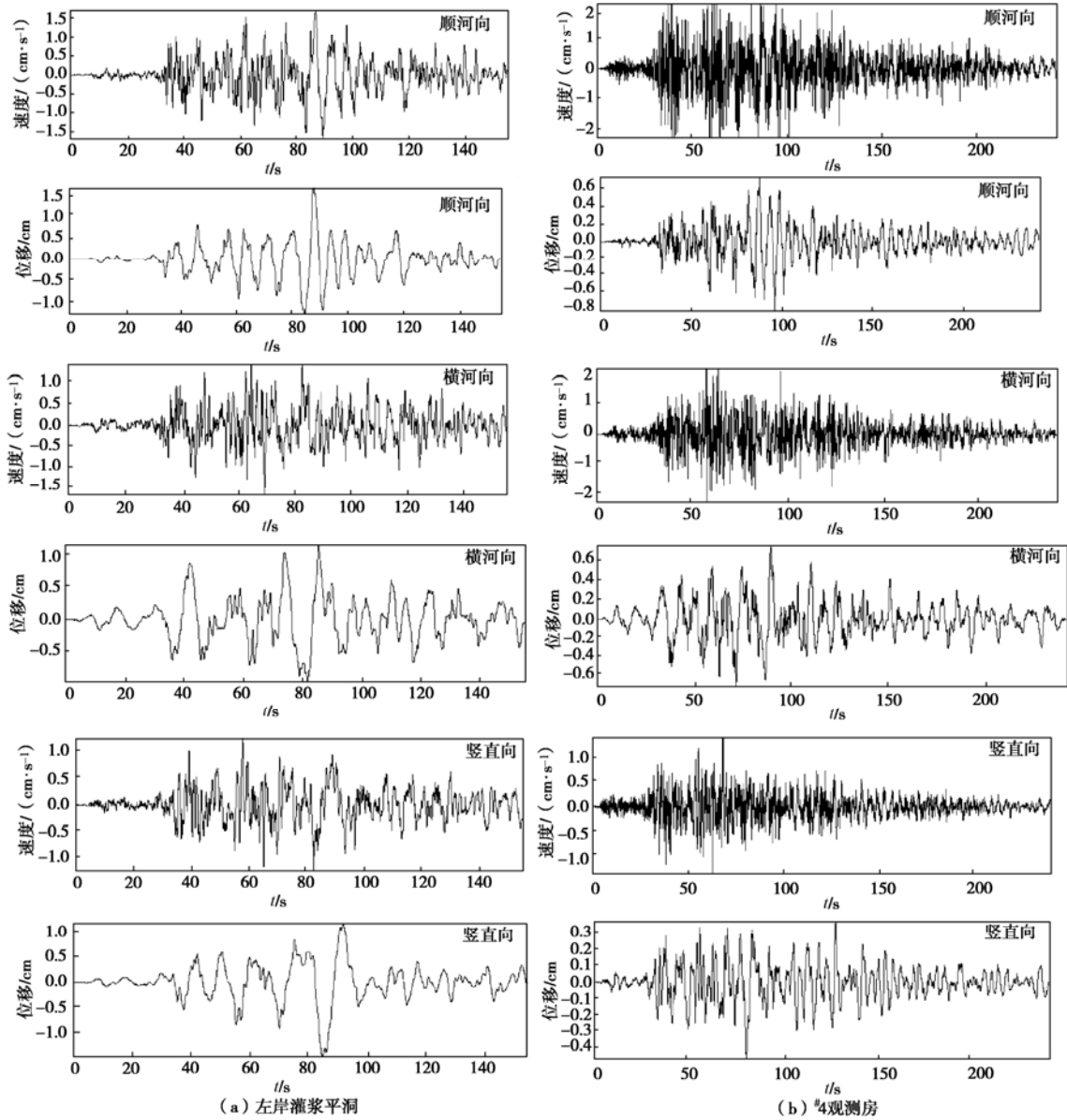


图4 “5.12”汶川大地震 大坝顺河向、横河向及竖直向速度、位移时程图

Fig. 4 Time histories of velocity and displacement in transverse, longitudinal and vertical directions during “5.12” Wenchuan Earthquake

图5显示了大坝最大断面沿下游坡面加速度峰值分布情况,沿大坝下游坡面顺河向和横河向加速度沿高程的增加先减小再增大,在坝顶和下游坝脚位置同时有极值,但坝顶的加速度要大于坝脚;在竖直向,沿大坝下游坡面的加速度却是先增大再减小, #5观测房位置有极值。从表2中加速度各方向的分量来看,除#5观测房位置,其它部位的加速度基本是EW向,即顺河向加速度最大,横河向次之,竖直向最小,但横河向加速度与顺河向加速度相差的幅度并不大。

另外,从表2中列出的加速度、速度和位移峰值看,虽然“5.12”汶川大地震的震级很高,持续时间很长,破坏性强,但是由于冶勒大坝据震中较远(约258公里),大坝各个部位在地震中的反应不大,最大加速度小于50 gal,速度和位移峰值也不大。

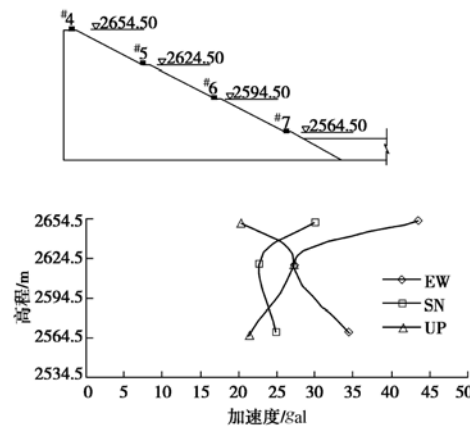


图5 “5.12”汶川大地震大坝最大断面沿下游坡面加速度峰值分布

Fig. 5 Distribution of acceleration on the largest section of Yele Dam along the downstream slope surface during “5.12” Wenchuan Earthquake

3.3 “5.12”汶川大地震频域分析

对地震记录进行快速傅立叶变换, 以下仅给出左岸灌浆平洞与坝顶#4 观测房记录的三方向加速度傅立叶谱, 如图 6 所示, 表 3 列出了频域分析的结果。

由表 3 知在“5.12”汶川大地震中, 基岩的各方向主频均较小, 在 1 Hz 以下, 主坝各部位反应的主频大于基岩, 其中顺河向和横河向 1.5~2.0 Hz, 竖直向的主频比其它两个方向高, 约为 2.5~3.0 Hz。由图 6 中可以明显看出坝体的滤波作用, 大坝对频率范围为 1.5~3.0 Hz 的地震动有显著的放大。

3.4 震后巡视检查与其它监测资料分析

5 月 12 日汶川地震主震发生后, 大坝上游迎水坡、下游背水坡表面无开裂、凹坑等异常情况, 坝顶防浪墙的原有裂缝无变化, 观测房、观测墩等设施亦无异常现象。坝址下游无浑水、新的渗水点等异常情况出现, 坝址左、右岸边坡未出现掉块、滑坡等情况。只是右岸排水廊道内一排水孔流量较大, 约 2.00 L/s。地震后几日坝址右岸施工廊道交通洞上部边坡由于下雨的原因, 出现轻微掉块, 其它部位情况仍正常。

同时, 大坝水平垂直位移, 沥青防渗墙与过渡料位错, 防渗墙与基座位错以及心墙与基座位错, 在地震前后基本没有变化。混凝土防渗墙内部应力、基座与施工廊道底板应力和沥青混凝土心墙底部应力在地震前后基本没有变化, 无异常值出现。大坝渗流量, 混凝土防渗墙上、下游渗压, 基础面渗压以及施工廊

道内渗压在地震前后也基本无变化。因此, 综合应力变形、渗流渗压资料分析, 可认为冶勒大坝在“5.12”汶川大地震后运行性态稳定, 情况基本正常。

4 “5.12”前强震数据分析的主要结论

在汶川地震之前, 冶勒大坝强震监测台阵所取得的记录中, 2007 年 10 月 23 日地震虽然震级不大, 但记录较为完整和具有代表性, 一定程度地表现出冶勒大坝在已经历实际地震中的整体反应情况, 可以与“5.12”汶川大地震中大坝的地震动动力反应进行对比。

图 7 显示了 2007 年 10 月 23 日地震大坝坝顶加速度峰值分布情况, 图 8 显示了大坝最大断面沿下游坡面加速度峰值分布情况。从图 7 中可以看出在 2007 年 10 月 23 日地震中, 坝顶加速度随着桩号增加而增加, 即从左岸到右岸逐渐增大, 并且从主坝的坝中断面到副坝开始的断面增加的幅度很大, 副坝坝顶的加速度相差很小。由图 8 可知, 在 2007 年 10 月 23 日地震中, 加速度峰值的分布与大坝在“5.12”汶川大地震中类似, 沿大坝下游坡面各方向加速度均是沿高程的增加先减小再增大, 在坝顶和下游坝脚位置同时有极值, 但坝脚的加速度大于坝顶。从加速度各方向的分量来看, 基本也是 EW 向, 即顺河向加速度最大, 横河向次之, 竖直向最小, 但横河向加速度与顺河向加速度相差的幅度并不大。

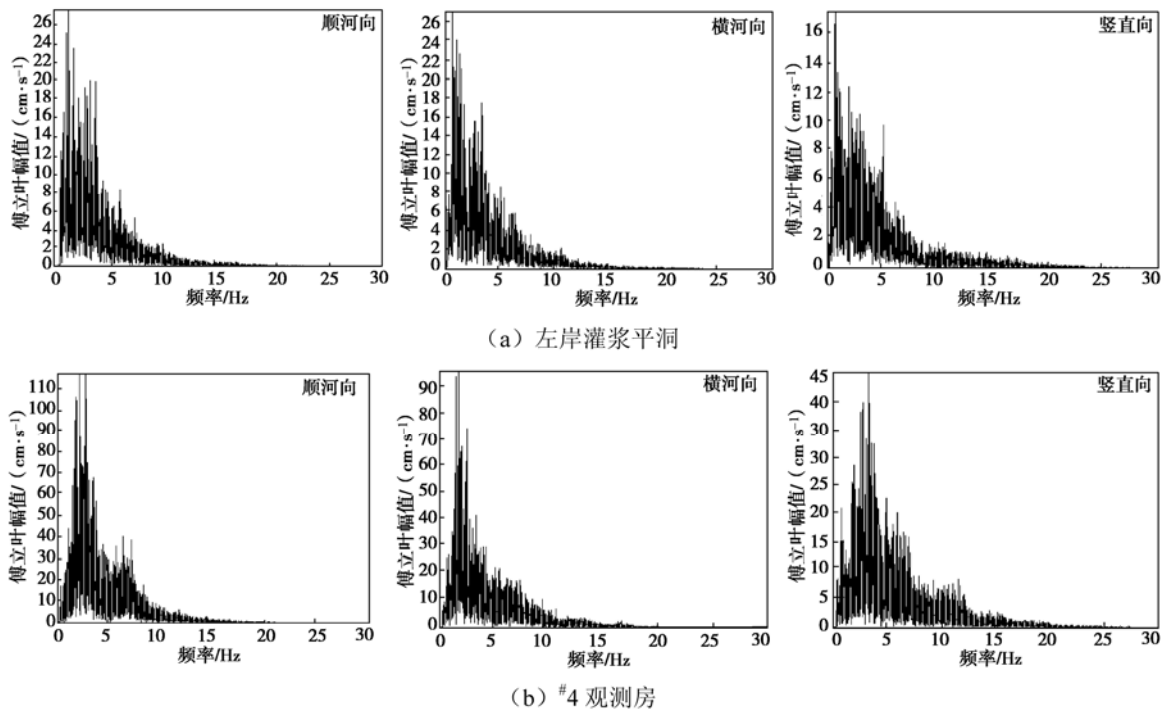


图 6 “5.12”汶川大地震大坝顺河向、横河向和竖直向傅立叶谱

Fig. 6 The Fourier spectra in transverse, longitudinal and vertical directions of “5.12” Wenchuan Earthquake

表3 “5.12”汶川大地震大坝各部位频域分析结果

Table 3 The spectrum analysis results of Yele Dam during “5.12” Wenchuan Earthquake

测站	分项	主频率 /Hz	主周期 /s	傅立叶谱幅值 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	测站	分项	主频率 /Hz	主周期 /s	傅立叶谱幅值 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
#4	顺河向	1.923	0.520	118.587	灌浆平洞	顺河向	0.916	1.092	28.112
	横河向	1.633	0.613	94.045		横河向	0.488	2.048	27.217
	竖直向	3.120	0.321	45.438		竖直向	0.555	1.800	17.638
#5	顺河向	1.395	0.717	81.680	监测廊道	顺河向	1.395	0.717	38.416
	横河向	1.633	0.613	67.807		横河向	1.395	0.717	42.332
	竖直向	2.881	0.347	42.389		竖直向	2.356	0.426	23.551
#7	顺河向	2.386	0.419	58.987					
	横河向	2.048	0.488	67.239					
	竖直向	2.637	0.380	34.476					

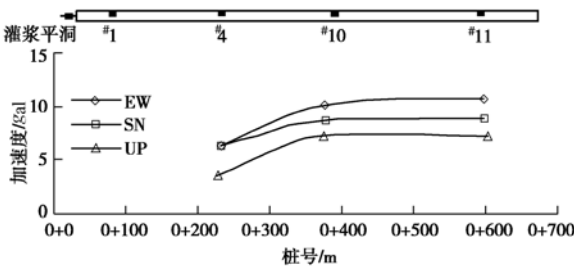


图7 2007-10-23地震大坝坝顶加速度峰值分布

Fig. 7 Distribution of acceleration on dam crest along the axis of Yele Dam during the earthquake on 2007-10-23

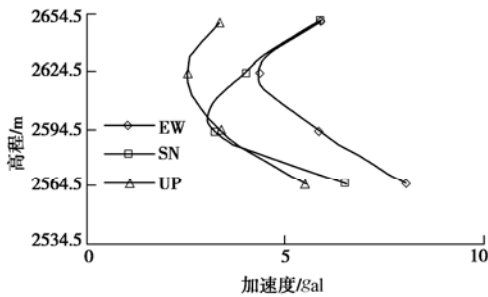


图8 2007-10-23地震大坝最大断面下游坡面加速度峰值分布
Fig. 8 Distribution of acceleration on the largest section of Yele Dam along downstream slope surface during the earthquake on 2007-10-23

根据以上所述冶勒大坝的地震反应规律，联系其所处的地质环境以及大坝结构，可以看出严重不对称的覆盖层分布对大坝地震动力反应的明显影响，由于坝基覆盖层从左岸到右岸逐渐加深，下伏基岩面陡倾河心，所以观测到的大坝最大加速度亦从左岸到右岸逐渐增大，并且横河向的地震反应与顺河向地震反应量值基本相当。此外，大坝地震反应是由坝体内部至坝体表面地震反应逐渐放大，所以大坝表面在坝顶与坝坡脚处均出现极值。

并且对2007年10月23日地震记录进行快速傅立叶变换，得到坝体各部位沿各方向的傅立叶谱，可知在2007年10月23日地震中大坝反应的主频较高，其中主坝各部位反应表现出的顺河向主频约为8 Hz，横河向主频差异较大，副坝坝顶各方向的主频较高，在

18 Hz左右。

5 结 论

(1) 冶勒大坝强震监测台阵成功获得的“5.12”汶川大地震记录持续时间长，主频较低，最大加速度峰值为 43.995 cm/s^2 。

(2) 冶勒大坝在汶川地震中的反应量值并不大，反应由坝体内部至坝体表面逐渐放大，在坝顶和坝脚位置具有极值。坝体反应的主频较低，并且大坝对频率范围为1.5~3.0 Hz的地震动有显著的放大。

(3) 综合对地震记录，巡视检查以及应力变形、渗流渗压监测资料的分析，冶勒大坝在“5.12”汶川大地震后运行性态稳定，情况基本正常。

(4) 通过对以往典型地震记录作对比分析，得到冶勒大坝在地震中表现出的与一般土石坝不同的反应规律，这与冶勒大坝下伏基岩面陡倾河心，从左岸到右岸坝基覆盖层逐渐加深的特殊地质条件密切相关。

参考文献:

[1] DARBRE G R. Strong-motion instrumentation of dams[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1995, 24: 1101 - 1111.

[2] 陈厚群. 中国水工结构重要强震数据及分析[M]. 北京: 地震出版社, 2000: 44. (CHEN Hou-qun. The important data on strong motion and analysis in hydraulic structures of China [M]. Beijing: Seismic Publishing House, 2000: 44. (in Chinese))

[3] 张力飞, 邢国良, 张敏. 龙羊峡重力拱坝强震分析[J]. 水力发电, 1998(12): 14 - 17. (ZHANG Li-fei, XING Guo-liang, ZHANG Min. The strong motion analysis of Longyangxia Arch Dam[J]. Water Power, 1998(12): 14 - 17. (in Chinese))