

熊堃, 何蕴龙, 肖伟, 等. 基于强震监测记录的冶勒大坝动力反应特性初步分析[J]. 地震工程学报, 2017, 39(3): 0434-0442. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0434.

XIONG Kun, HE Yun-long, XIAO Wei, et al. Preliminary Analysis of the Dynamic Response Characteristics of Yele Dam Based on Strong Motion Records[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(3): 0434-0442. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0434

基于强震监测记录的冶勒大坝动力反应特性初步分析^①

熊 堃¹, 何蕴龙², 肖 伟¹, 刘俊林³

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010;

2. 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;

3. 广东粤港供水有限公司, 广东 深圳 518021)

摘要: 冶勒沥青混凝土心墙堆石坝最大坝高为 124.5 m, 坝址区地震烈度高, 地质条件复杂。大坝上布设了 9 台强震仪组成的强震监测台阵, 自 2005 年 12 月开始投入运行至 2014 年 12 月底共获得有效记录 57 次, 其中包括汶川地震、攀枝花地震和芦山地震记录。对典型强震记录进行时域分析和频谱分析, 初步总结了冶勒大坝的动力反应特性。研究结果表明, 大坝坝顶部位的动力反应主要以放大为主, 并且随着底部 PGA 的减小, 坝体放大倍数明显增大; 由于地震动本身震源特性、传播途径的差异, 大坝在不同地震中动力反应的频谱特性明显不同, 但多次记录均显示土石坝体有较为明显的滤波作用。

关键词: 冶勒大坝; 强震记录; 沥青混凝土心墙坝; 动力特性

中图分类号: TV321; TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)03-0435-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0435

Preliminary Analysis of the Dynamic Response Characteristics of Yele Dam Based on Strong Motion Records

XIONG Kun¹, HE Yun-long², XIAO Wei¹, LIU Jun-lin⁴

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, Wuhan 430010, Hubei, China;

2. State Key Lab of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

3. GD Yue Gang Water Supply CO., LTD, Shenzhen 518021, Guangdong, China)

Abstract: Yele Dam is a rockfill dam with an asphaltic concrete core wall and a maximum height of 124.5 m. The geological conditions around the area are fairly complex and present high seismic intensity. The earthquake monitoring station, which consists of nine strong motion seismographs, obtained 57 seismic response records from May 2005 to December 2014, including those of recent earthquakes, such as the Wenchuan earthquake, the Panzhihua earthquake, and the Lushan earthquake. Time domain and spectral analyses were carried out based on the monitoring data, and some dynamic response features of Yele Dam during these earthquakes were preliminary

① 收稿日期: 2016-01-14

基金项目: 长江科学院开放研究基金项目(CKWV2015213/KY)

作者简介: 熊 堃(1984—), 男(汉族), 湖北谷城人, 博士, 高级工程师, 主要从事水工结构抗震与 Hardfill 筑坝技术研究。

E-mail: xiongekun2@cjwsjy.com.cn.

rily summarized. The results showed that the dynamic response of the dam crest was amplified in most earthquakes and that the amplification factor obviously increased with decreasing *PGA* in the dam bottom. Because of differences in earthquake source characteristics and transmission routes, the spectral features of the dam's seismic response during these earthquakes significantly differed. All of the records indicate that the earth and rockfill dam exert obvious filtering effects on earthquake waves.

Key words: Yele Dam; strong motion records; rockfill dam with an asphaltic concrete core wall; dynamic response characteristics

0 引言

我国现有土石坝抗震设计和安全评价标准仍主要依赖于 100 m 级高土石坝的工程经验,抗震设计理论和方法还不够成熟完善。在工程现场进行原型观测(包括实际震害调查),无疑是认识结构的动力性态最直接最可靠的方法,而且也是验证理论分析、模型实验方法和成果的重要依据^[1]。并且随着抗震设计理论的发展,目前动力法正作为解决大型复杂工程问题的抗震分析手段得到重视和研究,其分析方法本身发展十分迅速,但动力法分析中坝址地震输入机制的确定十分困难,缺乏合适的地震输入资料是目前大坝抗震安全性评价的最大障碍之一,亟需专门的研究。解决这个难题的有效途径是进行基于强震观测台阵的大坝现场观测与监测,这也是开展大坝地震输入机制基础研究,检验和发展大坝抗震安全理论和方法的重要手段^[2]。

我国从 1962 年新丰江建立第 1 个强震观测台站至今,设立了地震台站的大型水利工程有近 40 座^[3],但总体而言水工建筑物强震安全监测台阵数量少,加速度记录积累缓慢,且缺乏近场强震记录^[4]。在对土石坝强震监测的分析中,也以基线校正、加速度积分与求得反应谱等初步分析为主,较少结合实测记录对土石坝的动力特性与动力响应进行深入研究。但台湾学者黄俊鸿曾基于 4 座土石坝的小震监测资料,对强震数据进行反应谱与傅里叶谱分析,较为深入地统计研究了这 4 座土石坝的动力特性与动力响应特征^[5]。国际上则更多地利用强震监测记录与有限元等数值分析成果进行对比分析,检验计算方法和计算成果的合理性,如文献^[6-8]等。

2008 年我国发生了“5·12”汶川大地震,震区 6 座大型水库大坝,只有紫坪铺水库大坝布设了强震监测台站,遗憾的是地震发生时未能取得完整的大坝强震反应记录,使得这次汶川地震震中区无一座大坝强震记录^[9]。但位于四川南桷河上的冶勒沥青

混凝土心墙堆石坝,虽然其距离震中 258 km,但汶川地震发生时坝区有较为强烈的震感,大坝上布设的强震监测台阵获得了主震及诸多余震大量的完整地震记录,之后还对 2008 年攀枝花地震、2013 年芦山地震等均获得有效记录,这些实测记录是分析、了解该类坝型地震动力反应特性及其抗震安全性的宝贵资料。本文即综合这些实测资料,对冶勒大坝的动力反应规律进行了初步分析总结,下一步计划研究利用弱震记录识别坝体动力参数,结合深厚覆盖层土石坝的地震动输入机制研究,更深入地探讨冶勒大坝这种深厚覆盖层上高土石坝的抗震安全性。

1 工程概况

位于四川省南桷河上的冶勒大坝为沥青混凝土心墙堆石坝,最大坝高 124.5 m,在同类坝型中仅次于土耳其 139 m 高的 Kopru 坝和挪威 128 m 高的 Storglomvatn 坝。其主坝坝顶宽度 14 m,坝轴线长 411 m。大坝典型断面型式由上游至下游依次为上游围堰体、坝壳次堆石区、心墙过渡层、沥青混凝土心墙、心墙过渡层、主堆石区、次堆石区和下游盖重区。上游坝坡 1:2.0(中间设一级 4 m 宽马道)、下游坝坡分别为 1:1.8、1:2.2、1:2.2 和 1:2.2(中间设三级 4 m 宽马道)。右岸台地副坝为钢筋混凝土心墙堆石坝,由钢筋混凝土心墙及堆石坝壳组成。大坝平面布置如图 1 所示,图 2 给出了大坝最大横剖面。

冶勒大坝位于安宁河活动断裂带的北段,库区距下游安宁河活动断裂西支约 2 km,属外围强震波及区。工程区虽无强震记录,但其外围发生 7 级以上的强震 6 次,波及到库区的最大烈度达Ⅷ度,多数外围地震对坝区的影响不过Ⅴ度。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。

该工程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, 坝肩基岩埋深 420 m 以下。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。大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、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。

2 大坝强震监测台阵记录情况

2.1 大坝强震监测台阵

冶勒大坝上布置了由 9 台强震仪组成的强震监测台阵。强震仪采用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与 SLJ-100 三分向力平衡加速度计。当冶勒坝区外围发生地震时, 强震仪会自动感应, 触发震感并记录以及计算烈度。冶勒大坝坝轴线沿南北方向布置, 垂直于坝轴线为东西方向, 强震仪记录的顺河向以向东为正, 横河向以向北为正, 竖直向以向上为正。

强震仪基本沿大坝坝顶和最大横剖面布置, 图 1 显示了强震仪的平面布置情况, 图 2 显示了大坝

的最大横剖面及该剖面上强震仪的布置。其中位于坝顶的 T1、T4 和 T10 强震仪和分别位于最大横剖面下游坝面约 3/4、1/2、1/4 坝高位置的 T5、T6、T7 强震仪主要监测主坝表面的地震反应, 左岸灌浆平洞强震仪 T12 监测左岸基岩的地震情况, 位于副坝坝顶的 T11 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强震仪 T13 以监测心墙附近的地震反应, 并由其反映坝底部的地震动情况。

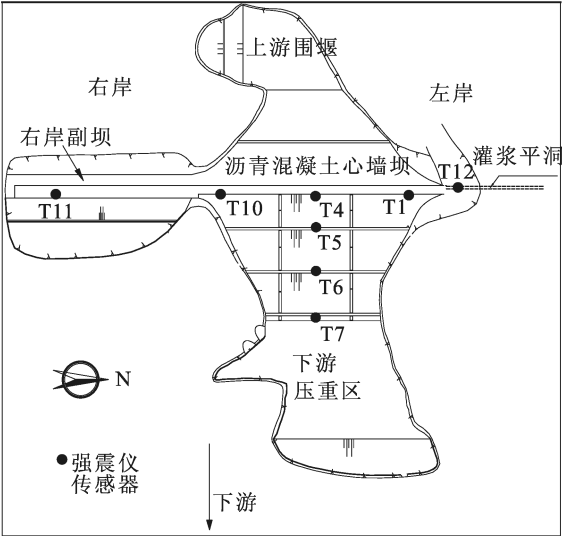


图 1 冶勒大坝平面布置图及其强震仪位置
Fig.1 The plane layout of Yele dam and arrangement of strong-motion instruments

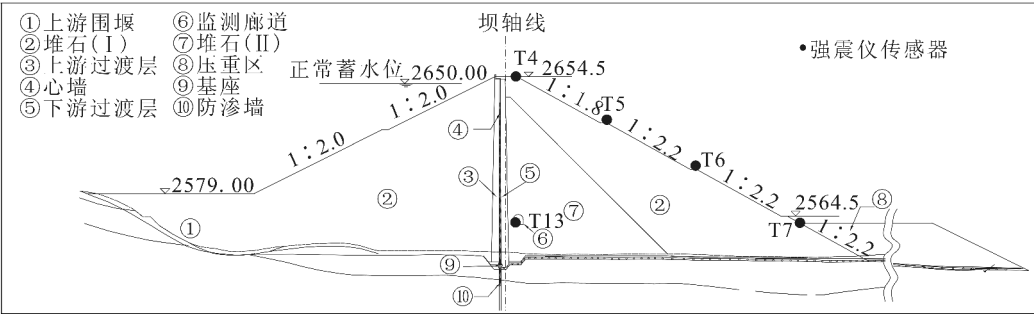


图 2 冶勒大坝最大横剖面及其强震仪位置
Fig.2 The arrangement of strong-motion instruments on the largest section of Yele Dam

2.2 数据记录情况

自 2005 年 12 月有 3 台仪器投入运行至 2014 年 12 月底, 冶勒大坝强震监测台阵共取得强震记录 57 次, 结合中国地震台网中心所公布的地震目录, 各次地震的基本要素和台阵的监测记录情况如表 1 所列。记录中包括了“5·12”汶川地震主震及数次余震^[10]、“8·30”攀枝花地震主震^[11]、芦山地震主

震及余震^[12]。从表中可知, 监测台阵所记录的大部分地震震级较小, 即使像汶川及攀枝花这样的大地震, 也因大坝距震中较远而只引发了较小的坝体动力响应。这些记录中最大地震动峰值为 126.5 gal。

3 次主要地震中大坝监测台阵的记录情况为:
2008 年 5 月 12 日汶川县境内发生了 $M_s8.0$ 地震, 震中烈度Ⅺ度, 在已收集的记录中最大加速度峰

表 1 所记录地震的基本要素与有效测站

Table 1 The essentials of earthquake records and effective stations

记录编号	地震日期	发震时刻	震级	震中距/km	库水位/m	有效地震记录测站	备注
1	2006-05-24	21:58:27	3.3	35	2 601.99	6	
2	2006-06-08	13:09:05	3.4	9	2 609.53	6	
3	2006-12-16	18:40:37	2.8	20	2 642.10	5	
4	2007-01-07	10:29:33	4.0	22	2 638.46	5,11	
5	2007-01-16	10:19:22	3.3	6	2 636.44	5,11	
6	2007-01-16	11:46:37	3.5	6	2 636.44	5,11	
7	2007-08-23	18:09:47	2.8	9	2 638.63	5	
8	2007-10-23	18:05:32	2.6	4	2 648.03	4、5、6、7、10、11	
9	2007-11-07	09:39:49	2.7	18	2 649.75	5、6、7、11、12	
10	2008-02-08	19:30:48	3.0	25.7	2 630.04	5、6	
11	2008-02-16	14:00:06	4.2	78.1	2 626.38	6	
12	2008-05-12	14:28:04	8.0	258	2 599.48	4、5、7、12、13	汶川地震主震
13	2008-05-12	14:43:15	6.0	262	2 599.48	4、5、13	
14	2008-05-12	15:34:47	5.0	262	2 599.48	4、5、6	
15	2008-05-12	19:10:58	6.0	306	2 599.48	4、5、6、13	
16	2008-05-12	21:40:54	5.1	262	2 599.48	4、5、6、13	
17	2008-05-13	15:07:11	6.1	351	2 599.38	4、5、6、7、13	
18	2008-05-25	16:21:02	6.4	454	2 608.15	4	
19	2008-05-29	12:48:01	4.6	455	2 610.55	5、6、12、13	
20	2008-06-18	20:59:32	4.2	74.34	2 617.14	4、5、6、7、13	
21	2008-08-01	16:32:44	6.1	466.20	2 622.68	1、4、10	
22	2008-08-30	16:30:50	6.1	262.54	2 634.23	4	攀枝花地震主震
23	2008-09-09	01:07:24	3.1	50.62	2 637.72	4、6	
24	2008-11-09	18:09:12	3.0	66.84	2 649.96	4、5、6、11、12、13	
25	2009-01-01	07:57:37	2.5	56.83	2 647.47	1、11	
26	2009-01-18	16:19:17	3.9	27.94	2 643.79	4、5、6、11、12、13	加速度幅值最大
27	2009-03-23	17:33:08	1.7	62.03	2 613.56	11	
28	2009-06-26	04:51:47	2.4	56.83	2 612.09	1、5、10、11	
29	2009-11-15	04:24:02	2.1	47.31	2 644.16	1、4、5、6、10、11、12、13	记录仪器最多
30	2009-11-23	15:25:21	4.8	291.83	2 644.52	1、4	
31	2009-11-28	00:04:02	5.0	350.75	2 644.72	4	
32	2010-02-03	06:27:22	2.0	72.42	2 635.16	12	
33	2011-01-25	20:56:13	2.3	50.77	2 634.95	6	
34	2011-02-12	16:45:57	2.2	56.83	2 631.69	10	
35	2011-02-12	17:51:17	2.9	56.83	2 631.69	1、10、11	
36	2011-03-01	18:08:31	2.5	66.84	2 624.69	1、6、10、11、13	
37	2012-07-24	23:50:07	3.2	66.84	2 633.01	6、11	
38	2013-04-20	8:02:46	7.0	212.474	2 600.61	1、5、6、10、11	芦山地震主震
39	2013-04-20	8:06:38	4.8	198.462	2 600.61	1、5、6、10、11	
40	2013-04-20	8:31:34	4.1	219.202	2 600.61	6	
41	2013-04-20	8:37:12	4.1	198.462	2 600.61	5、6	
42	2013-04-20	9:11:51	4.3	194.994	2 600.61	1、5、6、10、11	
43	2013-04-20	9:20:09	4.6	198.462	2 600.61	1、6、10、11	
44	2013-04-20	9:26:00	4.4	198.462	2 600.61	5、6、10、11	
45	2013-04-20	9:37:28	4.9	208.793	2 600.61	1、5、6、10、11	
46	2013-04-20	10:19:04	4.3	208.793	2 600.61	6	
47	2013-04-20	10:38:34	4.6	198.462	2 600.61	5、6	
48	2013-04-20	11:34:15	5.3	188.222	2 600.61	1、5、10、11	
49	2013-04-20	15:18:32	4.1	219.202	2 600.61	6	
50	2013-04-20	17:45:15	4.0	220.932	2 600.61	1、5、6、10、11	
51	2013-04-20	18:59:00	3.8	222.708	2 600.61	6	
52	2013-04-20	19:12:49	4.5	212.474	2 600.61	6、10	
53	2013-04-21	04:53:44	5.0	212.474	2 601.17	1、5、6、10、11	
54	2013-04-21	11:59:37	4.9	202.335	2 601.17	1、5、6、10、11	
55	2013-04-21	17:05:22	5.4	212.474	2 601.17	5、6	
56	2013-04-21	22:16:54	4.3	208.793	2 601.17	6	
57	2013-04-23	05:54:49	4.5	222.708	2 601.43	6	

值达 976 gal,地震动持续时间长达 1 120 s^[13]。冶勒大坝坝址距离震中 258 km,地震期间强震监测台阵有 6 台强震仪正常工作,共记录汶川地震主震及其余震 9 次,其中 5 台仪器获得了汶川地震主震和多次余震的记录,记录中包括“5·12”汶川大地震主震以及 6.0~6.4 级地震 5 次、5.0~5.9 级地震 2 次。

2008 年 8 月 30 日在攀枝花市仁和区、凉山彝族自治州会理县交界处发生了 $M_s6.1$ 地震,主震后发生多次余震。冶勒大坝距攀枝花地震震中 262.5 km,坝上仅有位于最大断面坝顶的 1 台仪器记录了攀枝花地震的主震,所得地震加速度峰值小于 3 gal,持续时间为 36.21 s。

2013 年 4 月 20 日四川省雅安市芦山县发生 $M_s7.0$ 地震,震源深度 13 km。此次地震发生在青

藏高原和四川盆地的交界处,位于龙门山前缘构造带的南段,距离汶川地震震中约 87 km,受灾面积约 15 720 km²。芦山地震为逆冲型地震,震源较浅,震中最大烈度Ⅸ度。冶勒大坝距震中约 212.5 km,坝址区震感较为强烈,强震监测台阵成功记录了坝址周边地区 4.0 级以上地震 20 次,其中有 5 台强震仪成功获得了主震记录及 9 次余震记录。

3 大坝动力反应特性初步分析

3.1 典型部位加速度反应时程特点

在 3 次大地震中,大坝典型部位的加速度时程记录见图 3~5。图中数据均经过了基线校正等处理,波形清晰完整,震相清楚。总的来看,坝顶部的动力响应相对较大,同一部位顺河向加速度最大,横

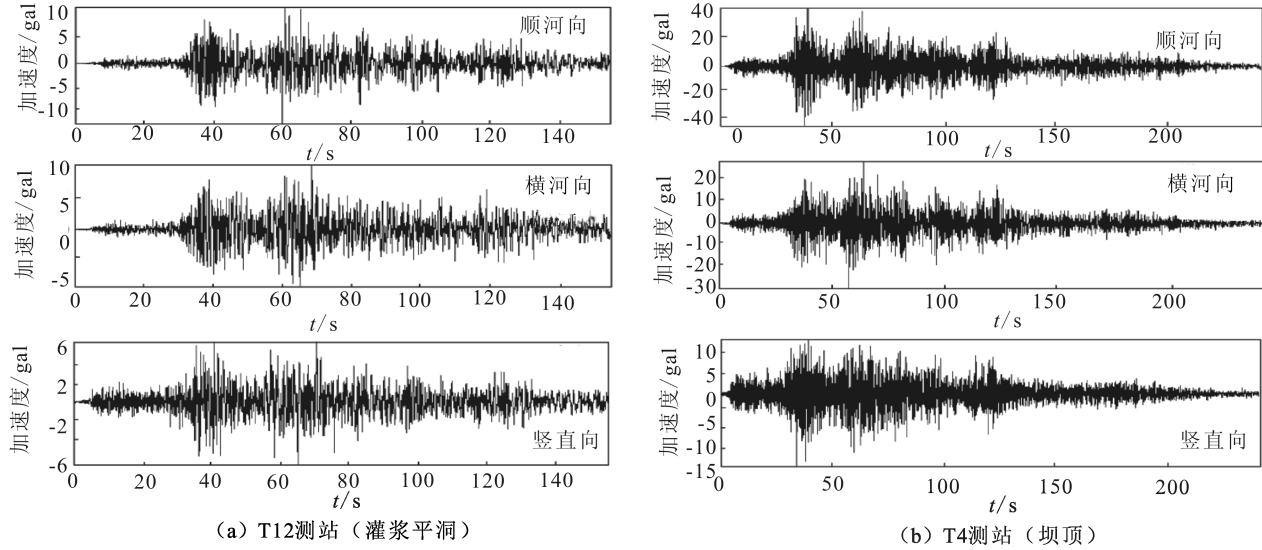


图 3 汶川地震大坝典型测站加速度时程图
Fig.3 Time histories of typical acceleration during Wenchuan earthquake

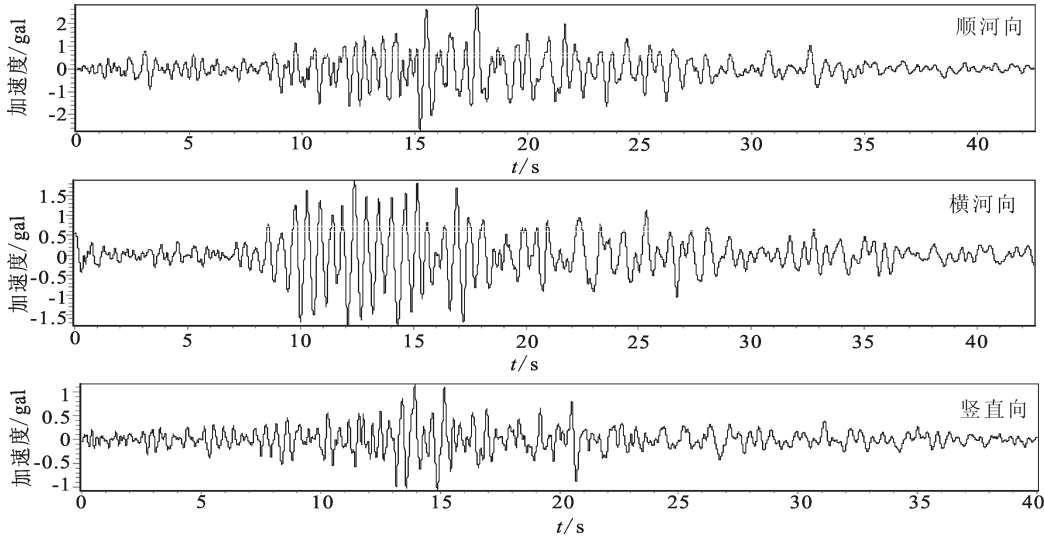


图 4 攀枝花地震大坝坝顶 T4 测站加速度时程图
Fig.4 Time histories of acceleration obtained by T4 staion during Panzhihua earthquake

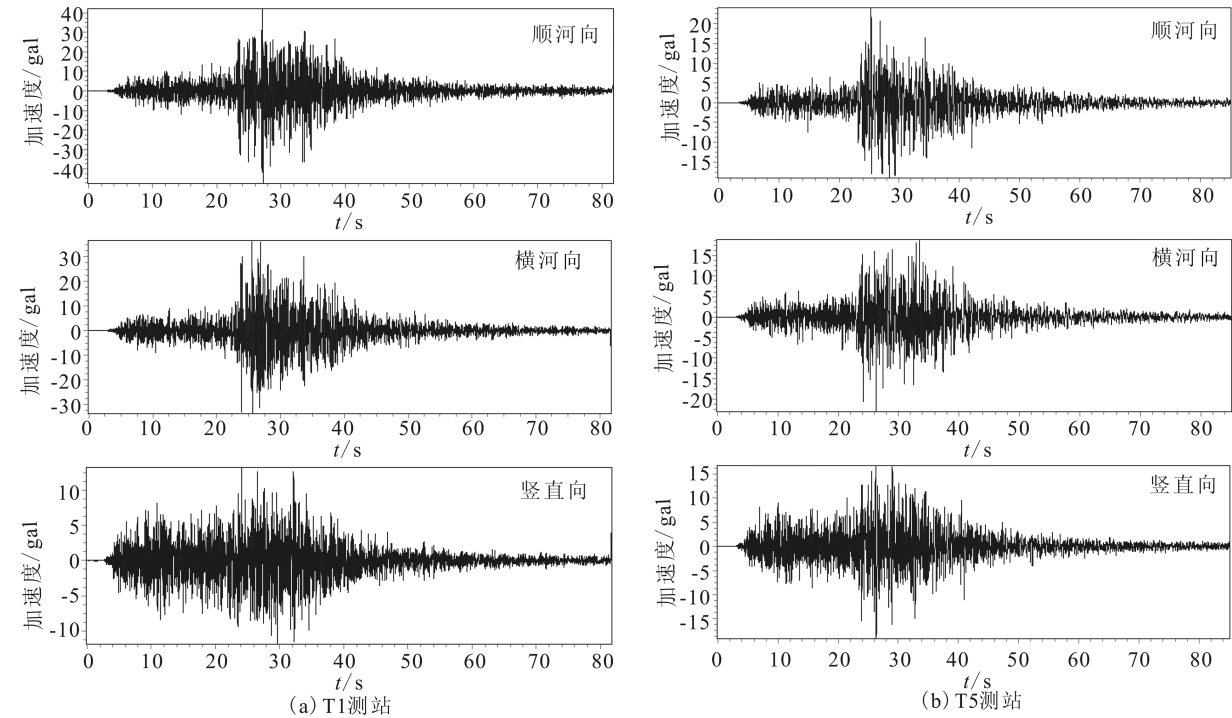


图 5 芦山地震大坝典型测站加速度时程图
Fig.5 Time histories of typical acceleration during Lushan earthquake

河向次之,竖直向最小。图 3 显示在汶川地震中,加速度波形表现出了两个峰值,由于发震断层破裂延伸很长,导致大坝地震记录一个突出的特点是地震动持续时间长达 200 s,这在大坝强震监测中十分罕见。

3.2 动力反应的 PGA 放大倍数

将坝顶部的加速度记录峰值除以底部峰值,所得系数称为 PGA 放大倍数。冶勒大坝在下游坝脚(T7)和心墙底部(T13)的记录可反映坝底部的动力反应情况,但 T7 测站记录相对较少,因此分别用坝顶(T1、T4、T10)和坝体上部(T5)记录的 PGA 除以 T6 和 T13 的 PGA,以考察坝体动力反应放大情况。

图 6 给出了坝顶(T1、T4、T10)和 T5 相对 T6

的动力放大情况。由图可知,由于震源特性、传播途径的不同,大坝动力反应的分布情况较为离散,但可以看出坝顶部位的 动力反应主要以放大为主,而放大倍数也有小于 1 的情况出现,即坝顶相对于坝体中下部并不总是放大;从图中可以看到,随着底部 PGA 的减小坝体放大倍数明显增大,这在 3 个方向的统计数据规律中均得到反映。

图 7 给出了坝体上部(T4、T5、T6)相对于心墙底部的动力放大情况。由图可知,3 个方向的 PGA 放大倍数均大于 1,即坝体在地震中对底部地震动力反应均为放大。在顺河向和横河向,底部 PGA 减小时放大倍数增大;在竖直向,放大倍数反而随着

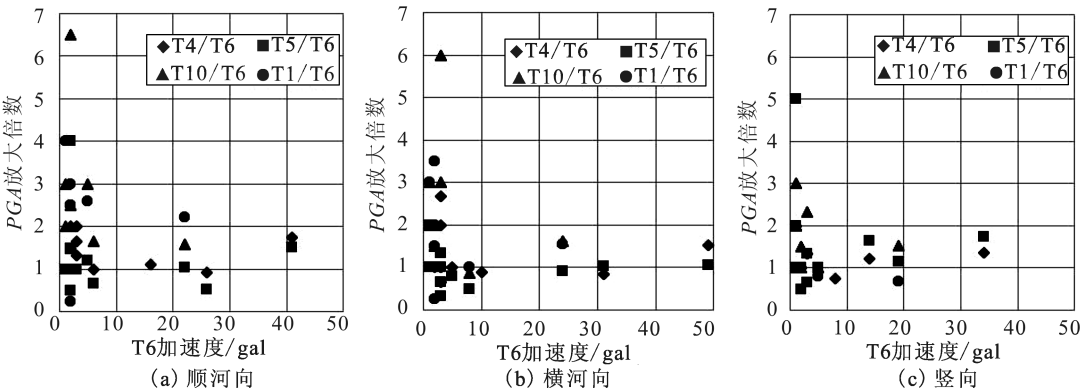


图 6 坝体上部相对于 T6 测点的放大倍数
Fig.6 Amplification factor of upper part of dam to T6

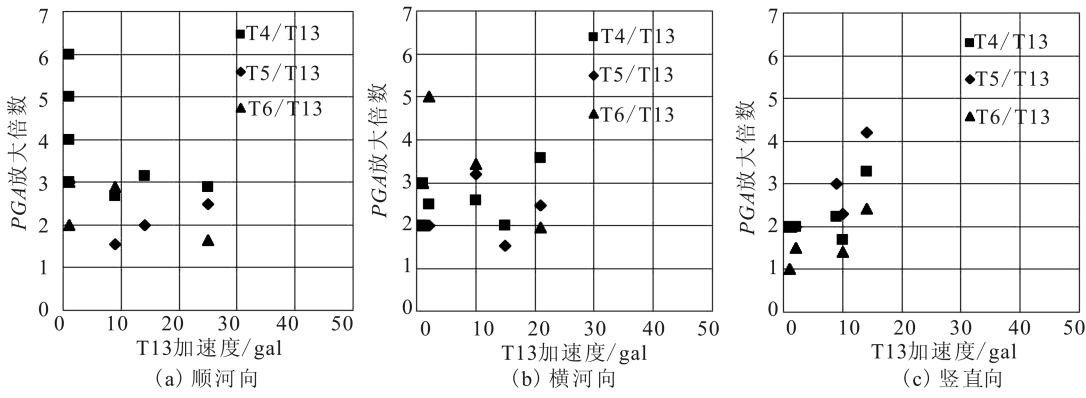


图 7 相对于 T13 心墙下部监测廊道位置的放大倍数

Fig.7 Amplification factor of upper part of dam to T13 in monitoring gallery at bottom of core wall

底部 PGA 的增大有增大的趋势。

3.3 动力反应的频谱特性

对地震记录进行快速傅里叶变换可得到傅里叶谱,图 8 至图 10 给出了典型部位记录的 3 方向加速度傅里叶谱。

由图 8 知在汶川地震中,灌浆平洞测站所反映的基岩动力反应各方向主频均较小(在 1 Hz 以下)坝顶反应的主频明显大于基岩,其中顺河向和横河向 1.9 和 1.6 Hz,竖直向的主频比其他两个方向高,

为 3.1 Hz。图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。而图 9 攀枝花地震记录中,坝顶部位傅里叶谱值较大的频率范围为 1~3 Hz,三方向主频分别为 1.8、1.9 和 2.3 Hz。图 10 的芦山地震记录频谱图反映了在地震激励下,大坝表现出多个振型的振动,在三方向上均有明显的双峰或多峰值现象,三方向幅值对应的主频率集中在 2~6 Hz。

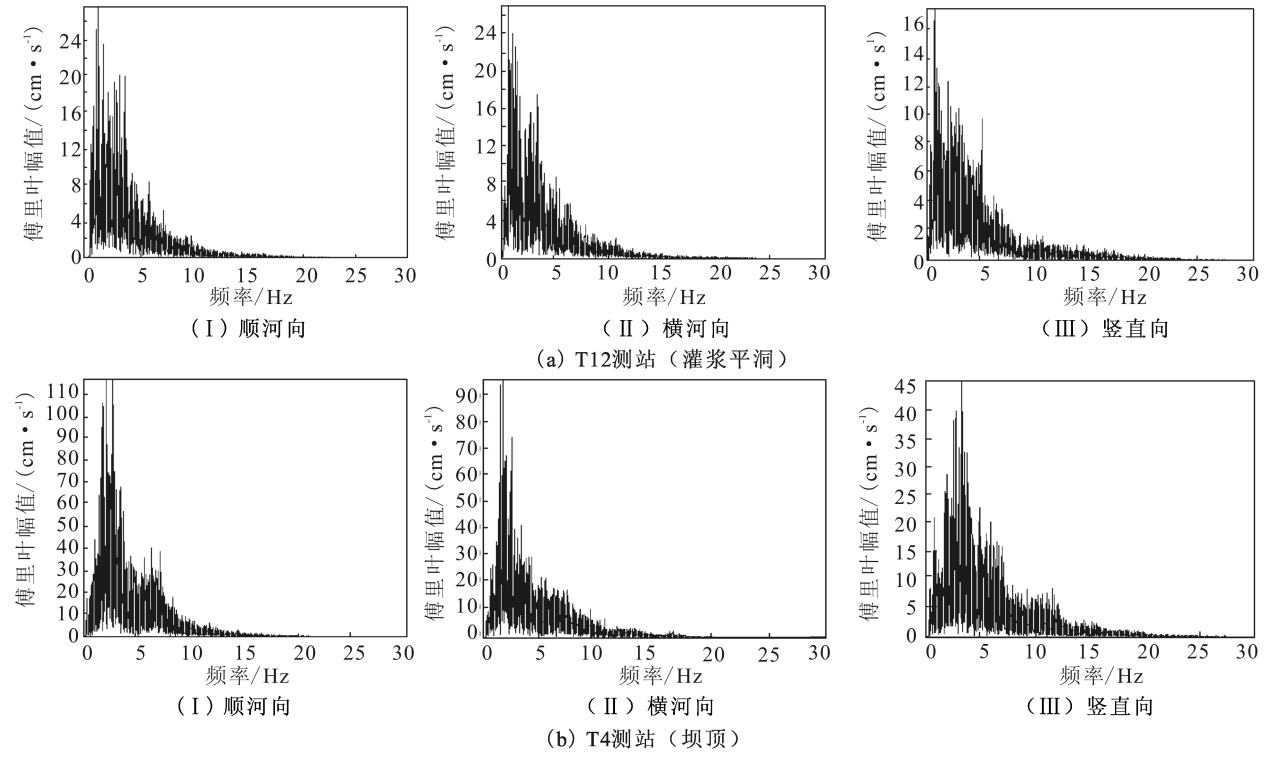


图 8 汶川大地震大坝顺河向、横河向和竖直向傅里叶谱

Fig.8 The Fourier spectra in transverse, longitudinal and vertical directions during Wenchuan earthquake

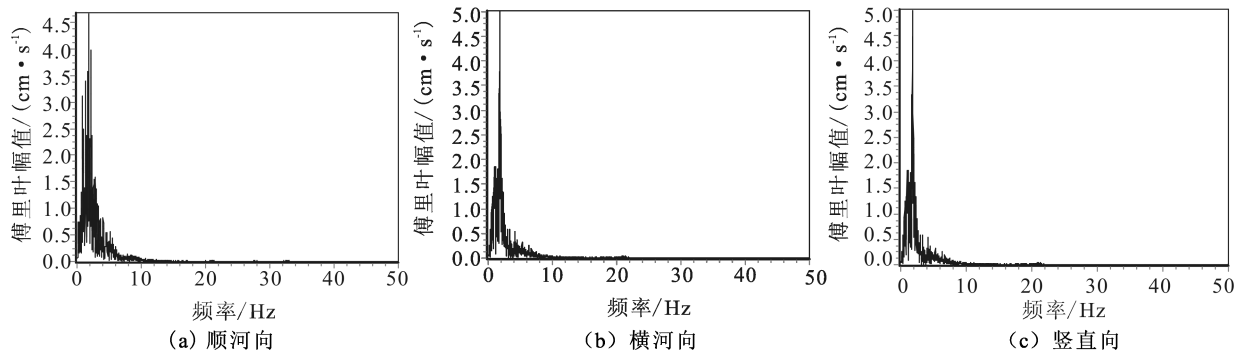


图 9 攀枝花地震大坝坝顶 T4 测站顺河向、横河向和竖直向傅里叶谱

Fig.9 The Fourier spectra in transverse, longitudinal and vertical directions of dam crest during Panzihua earthquake

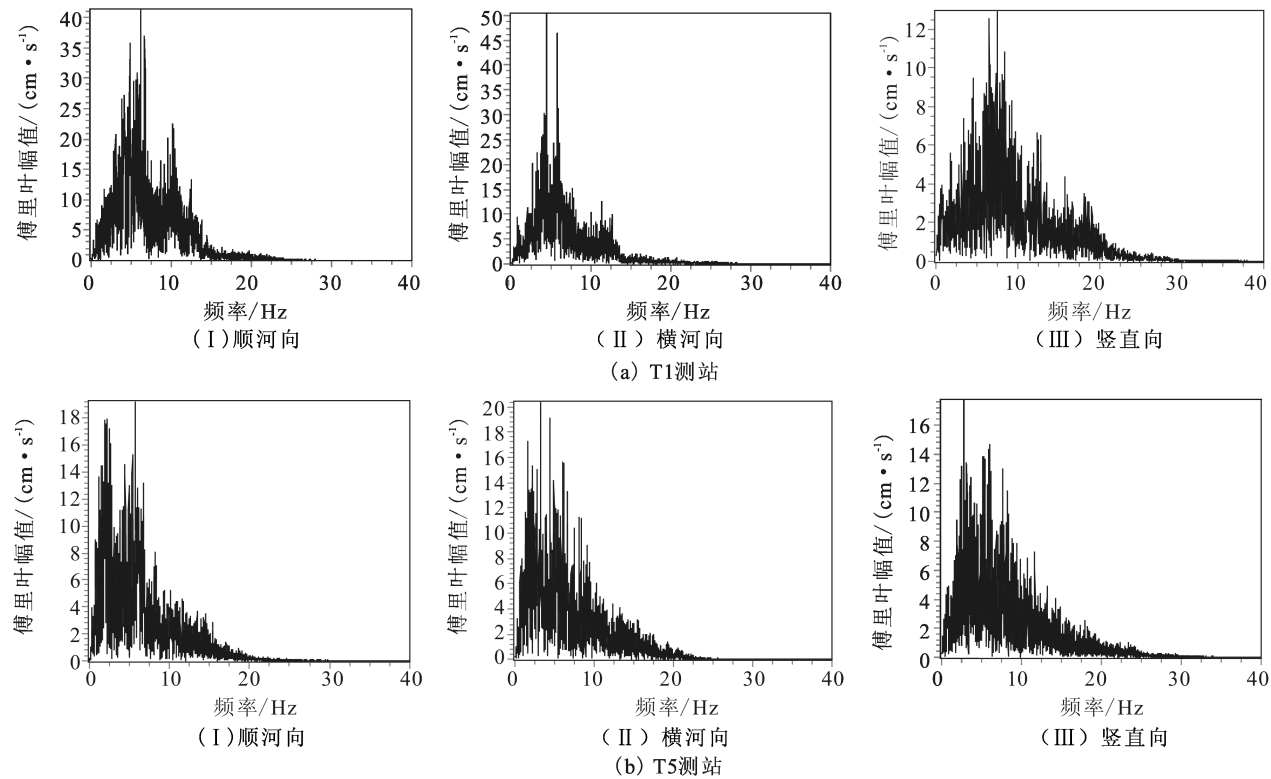


图 10 芦山地震大坝顺河向、横河向和竖直向傅里叶谱

Fig.10 The Fourier spectra in transverse, longitudinal and vertical directions during Lushan earthquake

4 结语

(1) 冶勒大坝上布设的强震监测台阵获得了 57 次完整有效的地震记录,这些实测记录是分析、了解该类坝型地震动力反应特性及其抗震安全性的宝贵资料。

(2) 通过时域分析可知,大坝坝顶部位的动力反应主要以放大为主,并且随着底部 PGA 的减小,坝体放大倍数明显增大;频域分析可知,由于地震动本身震源特性、传播途径的差异,大坝动力反应的频谱特性明显不同,但多次记录均表明坝体有较为明

显的滤波作用。

(3) 本文仅对冶勒大坝的动力反应规律进行了初步的分析总结,下一步计划研究利用弱震记录识别坝体动力参数,并结合深厚覆盖层土石坝的地震动输入机制研究,深入地探讨冶勒大坝这种深厚覆盖层上高土石坝的抗震安全性。

参考文献(References)

[1] 汪闻韶,金崇磐,王克成.土石坝的抗震计算和模型实验及原型观测[J].水利学报,1987,18(12):1-16.

WANG Wen-shao, JIN Chong-pan, WANG Ke-cheng. A

- Seismatic Calculation, Model and Prototype of Experiments and Field Monitoring of Earth-rock Dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 18(12): 1-16. (in Chinese)
- [2] 郭永刚. 水利水电工程强震监测和强震监测仪器[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 422-426.
- GUO Yong-gang. Observation and Instrument of Strong Earthquake Motion in Hydroelectric Engineering [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(3): 422-426. (in Chinese)
- [3] 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.
- CHEN Hou-qun. The Important Data on Strong Motion and Analysis in Hydraulic Structures of China [M]. Beijing: Seismological Press, 2000. (in Chinese)
- [4] 许光, 苏克忠, 郭永刚, 等. 国内水工建筑物强震安全监测技术进展[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(2): 63-67.
- XU Guang, SU Ke-zhong, GUO Yong-gang, et al. Technical Advances of Strong Motion Safety Monitoring in Hydraulic Structures in China [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2012, 36(2): 63-67. (in Chinese)
- [5] Jin-Hung Hwang, Chia-Pin Wu, Jui-Te Chou. Motion Characteristics of Compacted Earth Dams Under Small Earthquake Excitations in Taiwan [J]. Geotechnical Earthquake and Engineering and Soil Dynamics IV Congress, 2008, 1-12.
- [6] M Y Zkan M Erdik, M A Tun, et al. An Evaluation of Sürgü Dam Response during 5 May 1986 Earthquake [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, 15(1): 1-10.
- [7] Mourad Zeghal, Ahmed M. Abdel-Ghaffar. Analysis of Behavior of Earth Dam using Strong-motion Earthquake Records [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(2): 266-277.
- [8] S Rampello, E Cascone, N Grosso. Evaluation of the Seismic Response of a Homogeneous Earth Dam [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(5): 782-798.
- [9] 郭永刚, 苏克忠. 从汶川大地震论水利工程强震安全监测[J]. 水电自动化与大坝监测, 2009, 33(3): 56-59, 67.
- GUO Yong-gang, SU Ke-zhong. Review of Strong Motion Safety Monitoring for Hydro-engineering Structures Based on the Case of Wenchuan Earthquake [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2009, 33(3): 56-59, 67. (in Chinese)
- [10] 熊埜, 何蕴龙, 张艳锋. “5·12”汶川大地震时冶勒大坝实测动力反应[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1575-1580.
- XIONG Kun, HE Yun-long, ZHANG Yan-feng. Recorded Seismic Response of Yele Dam in 5·12 Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1575-1580. (in Chinese)
- [11] 曹学兴, 何蕴龙, 熊埜, 等. 汶川地震对冶勒大坝影响分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3542-3548.
- CAO Xue-xing, HE Yun-long, XIONG Kun, et al. Effects of Wenchuan Earthquake on Yele Dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3542-3548. (in Chinese)
- [12] 苗君, 何蕴龙, 曹学兴, 等. 芦山地震冶勒大坝强震监测资料分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 225-232.
- MIAO Jun, HE Yun-long, CAO Xue-xing, et al. Analysis of Strong Motion Seismograph Data at Rockfill Yele Dam during Lushan Earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 225-232. (in Chinese)
- [13] 周朝晖. 2008 年四川汶川 8.0 级地震强震动台网观测记录[J]. 四川地震, 2008, 4(4): 25-29.
- ZHOU Zhao-hui. The Strong Ground Motion Recordings of the $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake in Sichuan Province [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2008, 4(4): 25-29. (in Chinese)