

宋晓春, 姜慧, 王立新, 刘智, 朱敏, 2017. 新丰江水库大坝贯穿裂缝及其稳定性分析. 震灾防御技术, 12 (2): 298—305.
doi: 10.11899/zzfy20170206

新丰江水库大坝贯穿裂缝及其稳定性分析¹

宋晓春^{1, 2, 3, 4)} 姜 慧^{1, 2, 3)} 王立新^{1, 2, 3)}
刘 智^{1, 2, 3)} 朱 敏⁴⁾

1) 广东省地震局, 广州 510070

2) 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070

3) 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070

4) 防灾科技学院, 北京 101601

摘要 1962 年 3 月 19 日新丰江水库大坝附近发生 M_S 6.1 级强烈地震后, 13—17#坝段在 108.5m 高程处出现了长达 82m 的贯穿裂缝, 导致水库渗漏, 其后虽进行了加固处理, 但经过 50 多年的运营, 贯穿裂缝的现状如何, 备受各级政府及专家学者的关注。本文利用近些年大坝上的多次小震观测记录, 通过对有无贯穿裂缝坝段的地震加速度时程傅氏谱及上下坝体传递函数的对比分析, 对 14#坝段的整体性和稳定性进行了系统研究。结果表明, 到目前为止, 大坝贯穿裂缝没有明显恶化, 但整体性依然较差, 仍然是大坝稳定性的最大隐患。

关键词: 新丰江水库大坝 贯穿裂缝 稳定性

引言

自新丰江水库蓄水以来, 库区就频繁发生地震。其中, 1960 年 7 月 18 日发生了 M_S 4.3 级地震, 之后对大坝进行了一期加固; 1962 年 3 月 19 日发生了 M_S 6.1 级强烈地震, 13—17#坝段在 108.5m 高程处出现了长达 82m 的贯穿裂缝 (图 1), 导致水库渗漏, 但没有产生严重的后果, 之后对大坝进行了二期加固 (翁昌瑜, 2010)。在此之后, 库区仍不断发生地震, 并且延续至今。

108.5m 高程的贯穿裂缝在 M_S 6.1 级强烈地震后经过灌浆、插筋及上游防渗和下游沿裂缝增设混凝土护墙等加固措施的专门处理, 其后在 1994 年中国地震局工程力学研究所同新丰江电厂合作用冲击弹性波法确认了该贯穿裂缝在该高程坝内呈高低不平、复杂分布的状态 (林俊高等, 1998; 翁昌瑜, 2010)。经过 50 多年的安全运行, 贯穿裂缝的现状如何, 其对大坝整体性和稳定性是否有影响, 成为各级政府及专家学者关注的问题。因此, 本文通过探究大坝 5#和 14#坝段贯穿裂缝上下测点的地震加速度时程傅氏谱和它们之间传递函数的特性, 来研究加固处理后贯穿裂缝上下坝体间的整体性和稳定性。

1 基金项目 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室、广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室建设项目 (2011A060901006), 广东省重大科技专项项目 (2012A 080102008), 地震科技星火计划 (XH16031), 中央高校基本科研业务费 (ZY20150312) 共同资助

[收稿日期] 2016-04-28

[作者简介] 宋晓春, 男, 生于 1988 年。在读硕士。研究方向: 结构抗震、结构健康监测。E-mail: 609557081@qq.com

[通讯作者] 姜慧, 男, 生于 1964 年。博士, 研究员。研究方向: 地震工程、结构抗震。E-mail: 13710390996@139.com

1 工程概况及强震动监测台阵简介

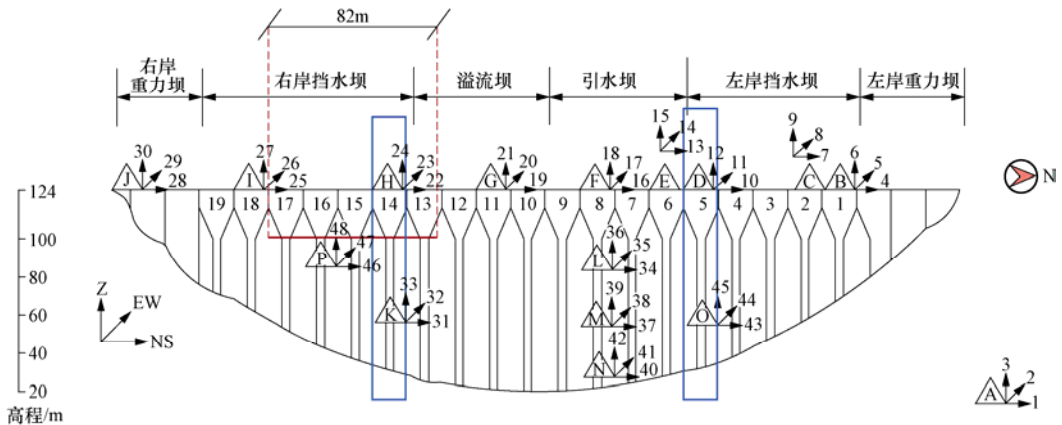
新丰江水电站位于广东省河源市境内东江支流新丰江最后一个峡谷的出口处,工程原设计以发电为主,目前以供水为主,兼顾发电、防洪、航运等,是一座综合利用的水利枢纽工程。大坝坝轴线长 440m,坝顶高程 124m,最大高度 105m,最大坝底宽度 102.5m,上下游坝面坡度均为 1: 0.5,由 19 个长 18m 的支墩坝和两岸重力坝组成(朱葳等,1998;李雪林,2008),其中 6—9# 为发电引水坝段,10—13# 为溢流坝段,其余皆为挡水坝段(首培休等,1988),如图 1。

为更好地了解大坝在地震作用下的动力反应特性,2012 年广东省地震局将大坝原有强震动观测台阵改造为实时监测台阵。本台阵在大坝的坝基、坝身和坝顶等特征部位共布设 16 个测点,包括 15 个结构测点和 1 个基岩自由地表测点,共 48 个通道(李敬等,2014)。台阵测点布置及贯穿裂缝位置如图 1 所示。

2 研究对象及资料概况

2.1 研究对象

由大坝强震动台阵测点布置图(图 1)可知,108.5m 高程贯穿裂缝所在的坝段(13—17#)中,只有 14# 坝段在裂缝上下布置测点(H 测点和 K 测点),故选取 14# 坝段为研究对象。另外,选取与 14# 坝段坝高、测点布置全部一致的 5# 坝段作为进行对比分析的参考对象。本文在传递函数计算分析中将 O 测点和 K 测点的地震加速度记录作为输入,D 测点和 H 测点的地震加速度记录作为输出进行分析。



红色实线为贯穿裂缝所在位置;蓝色框内为分析所用坝段

图 1 新丰江水库大坝强震动台阵测点布置图

Fig. 1 The set-up of strong motion array of the Xinfengjiang reservoir dam

2.2 地震及观测数据资料

选取 2014 年和 2015 年广东省河源地区发生在大坝附近的 8 次有记录的地震(见表 1),其中前 6 号地震的震中方位相近,7、8 号地震震中方位相近(图 2)。图 3 为大坝强震动台阵 23 通道在 8 次地震发生时的加速度时程输出记录,当地震发生时测点的地震动比环境振动大很多,个别地震测点的峰值加速度达到了 100gal 以上,对新丰江大坝产生了明显的震动。

表 1 新丰江水库附近 8 次有记录的地震

Table 1 Eight recorded earthquakes near Xinfengjiang reservoir

序号	发震时间	纬度/° N	经度/° E	震级/ M_s	深度/km	到大坝的距离/km
1	2014-05-24 12:33:04	23.45	114.38	3.30	13	41.45
2	2014-06-20 05:30:45	23.43	114.42	3.00	8	40.58
3	2014-07-11 02:25:48	23.43	114.43	3.00	7	39.98
4	2015-03-05 15:54:50	23.45	114.37	2.80	12	42.14
5	2014-08-10 14:38:48	23.43	114.43	2.90	8	39.97
6	2015-04-29 10:35:25	23.43	114.36	2.90	7	44.46
7	2014-04-25 16:07:10	23.54	114.29	4.40	10	42.46
8	2014-07-11 13:43:24	23.54	114.28	4.50	10	43.35



图 2 新丰江水库大坝和地震震中分布图

Fig. 2 Distribution of the earthquake epicenters near Xinfengjiang reservoir dam

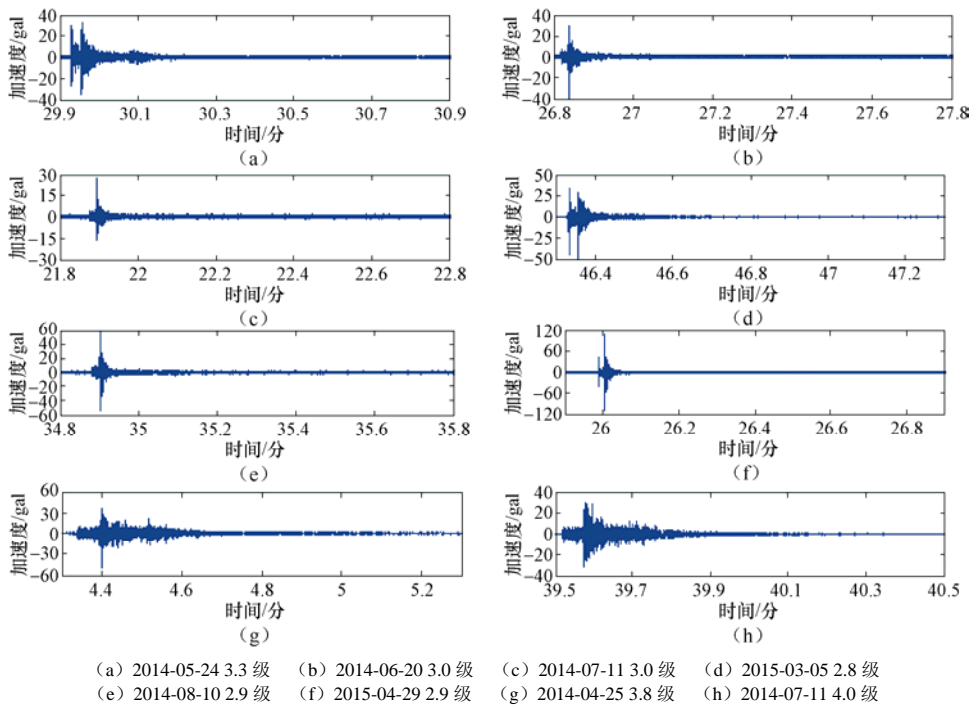


图 3 23 通道 8 次地震加速度记录

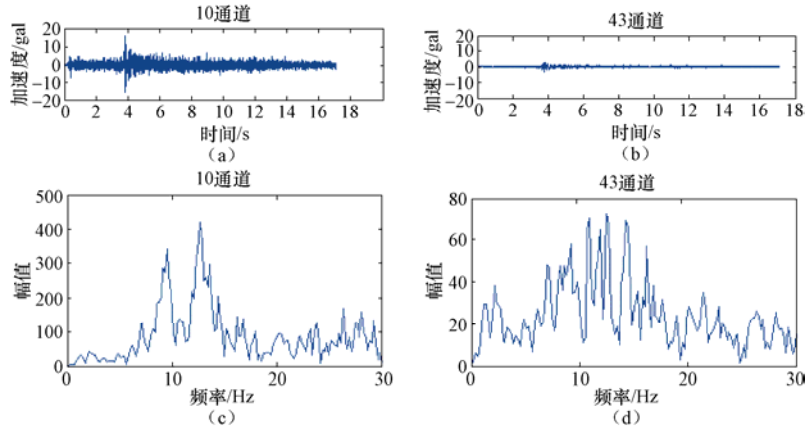
Fig. 3 Acceleration time histories of 8 earthquakes from the 23th channel

3 大坝稳定性分析

本文采用傅里叶谱和传递函数对贯穿裂缝上下坝体的稳定性进行研究。

3.1 地震动傅氏谱分析

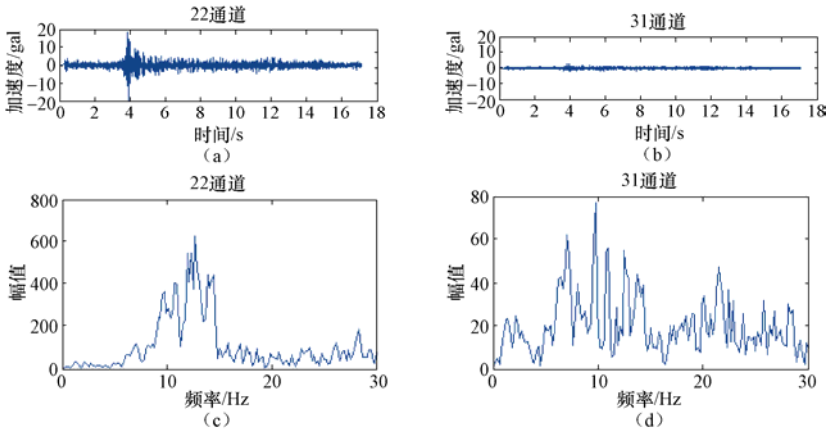
5#坝段 10 通道和 43 通道以及 14#坝段 22 通道和 31 通道在 8 号地震中的加速度时程及其傅里叶谱如图 4 和图 5 所示：



(a) 10 通道加速度时程 (b) 43 通道加速度时程 (c) 10 通道加速度傅里叶谱 (d) 43 通道加速度傅里叶谱

图 4 5#坝段坝轴向通道在 8 号地震中的加速度时程及傅里叶谱

Fig. 4 Acceleration time history and Fourier spectrum of No.8 earthquake from No.5 dam axial channel



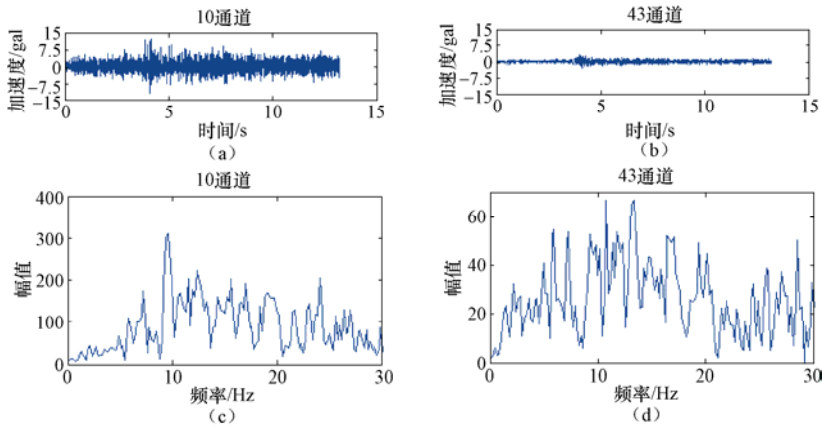
(a) 22 通道加速度时程 (b) 31 通道加速度时程 (c) 22 通道加速度傅里叶谱 (d) 31 通道加速度傅里叶谱

图 5 14#坝段坝轴向通道在 8 号地震中的加速度时程及傅里叶谱

Fig. 5 Acceleration time history and Fourier spectrum of No.8 earthquake from No.14 dam axial channel

5#坝段 10 通道和 43 通道以及 14#坝段 22 通道和 31 通道对应 7 号地震中的加速度时程及其傅里叶谱如图 6 和图 7 所示。

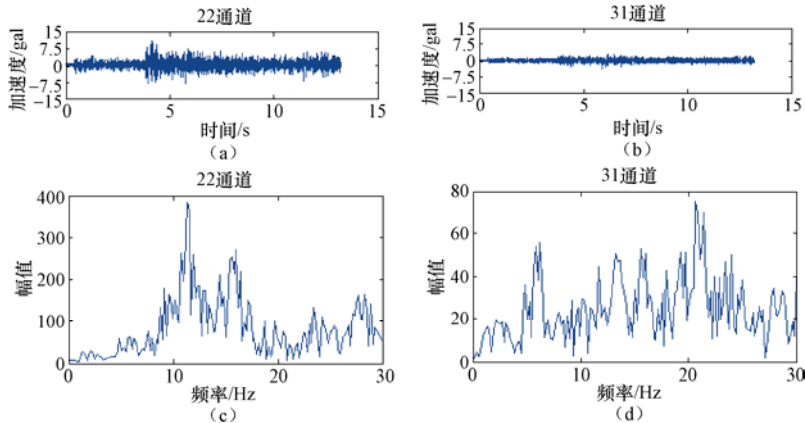
由图 4、5、6、7 中 (a)、(b) 加速度时程的峰值特性可知，5#和 14#坝段的上坝段相对下坝段，其地震动放大作用很明显。由图 4、5、6、7 中 (c)、(d) 加速度时程的频率特性可



(a) 10 通道加速度时程 (b) 43 通道加速度时程 (c) 10 通道加速度傅里叶谱 (d) 43 通道加速度傅里叶谱

图 6 5#坝段坝轴向通道对应 7 号地震中的加速度时程及傅里叶谱

Fig. 6 Acceleration time history and Fourier spectrum of No.7 earthquake from No.5 dam axial channel



(a) 22 通道加速度时程 (b) 31 通道加速度时程 (c) 22 通道加速度傅里叶谱 (d) 31 通道加速度傅里叶谱

图 7 14#坝段坝轴向通道对应 7 号地震中的加速度时程及傅里叶谱

Fig. 7 Acceleration time history and Fourier spectrum of No.7 earthquake from No.14 dam axial channel

知, 坝体对频率范围为 5—15Hz 的振动放大效应明显, 但 14#坝段坝体上坝段对 15Hz 以上高频地震动成分的放大作用明显低于 5#坝段, 表明贯穿裂缝还是存在影响的, 它阻碍了高频地震动的传递, 而 14#坝段坝体 22 通道与 5#坝段的 10 通道相比, 在 15Hz 以上明显偏小, 高频截频效应明显, 说明 14#坝段坝体上下坝的整体性较 5#坝段有明显不同。由以上分析可推断, 14#坝段贯穿裂缝上下坝体间的整体性明显比 5#坝段差。但在小震的作用下 15Hz 以下的低频地震动传递特性接近, 说明地震没有造成贯穿裂缝明显错动, 原有稳定性没有打破。

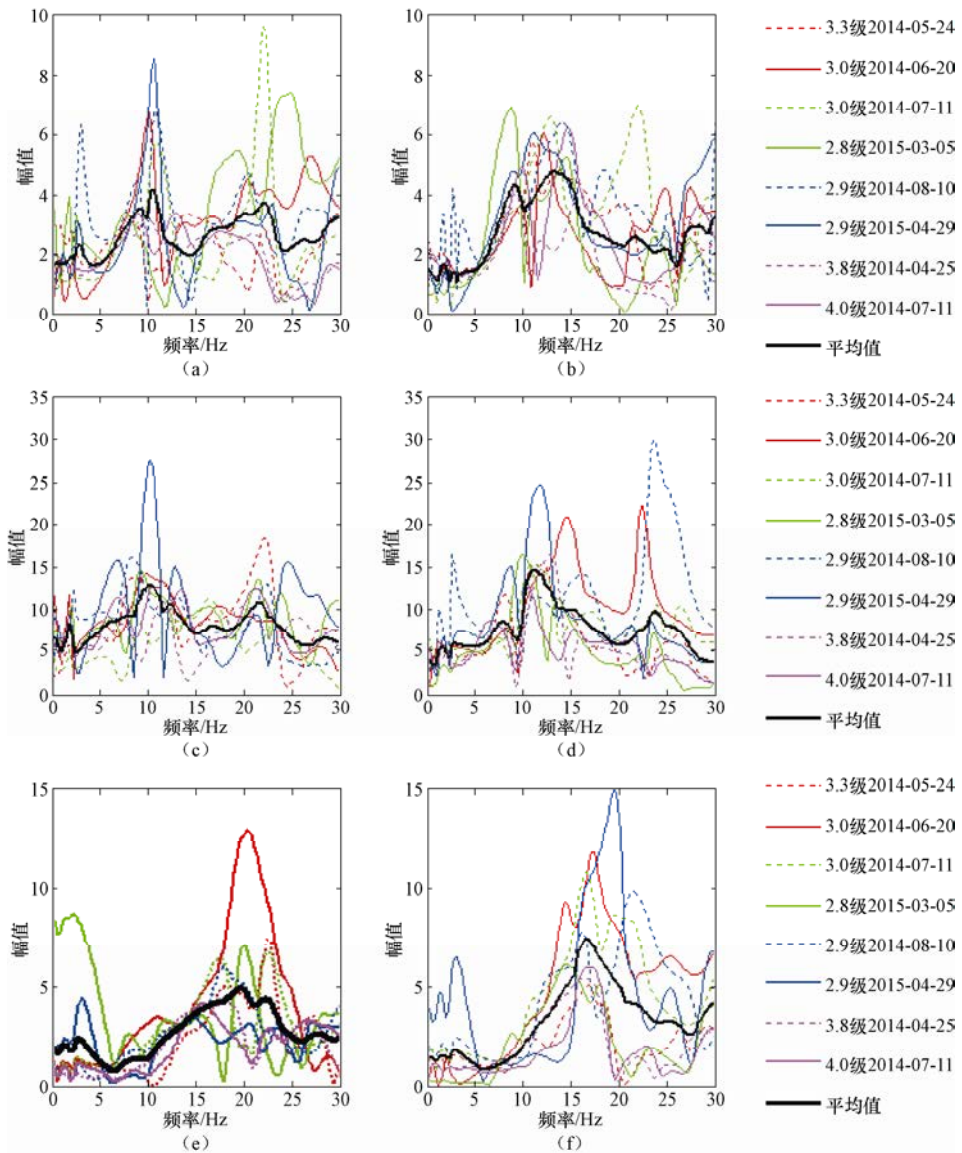
3.2 传递函数计算结果分析

传递函数是频域分析中的一个重要概念。一般把具有线性特性的对象的振(震)动信号输出与输入之间关系的谱比称为传递函数。频域传递函数其实质也即: 当体系受到一简谐输入激励时, 体系的稳态输出(即体系的反应)与输入的比值。其计算公式如下:

$$H_{xy}(f) = S_y(f)/S_x(f) = P_{xy}(f)/P_{xx}(f) \quad (1)$$

其中, $H_{xy}(f)$ 为传递函数; $S_y(f)$ 为输出信号的傅里叶谱; $S_x(f)$ 为输入信号的傅里叶谱; $P_{xy}(f)$ 为输入和输出信号的互功率谱; $P_{xx}(f)$ 为输入信号的自功率谱 (丁浩, 2008; 万永革, 2007)。

图 8 为 5#和 14#坝段在 8 个地震发生时坝轴向、顺河向、竖向的传递函数及其平均值曲线图。



(a) 5#坝段坝轴向 (b) 14#坝段坝轴向 (c) 5#坝段顺河向 (d) 14#坝段顺河向 (e) 5#坝段竖向 (f) 14#坝段竖向

图 8 5#、14#坝段对应 8 个地震情况下三分向的传递函数及平均值曲线图

Fig. 8 Transfer function of three components and their average of section No.5 and No.14 under 8 earthquakes

测点的加速度记录是由从基底传出的地震波在坝段之间经折射和反射后监测得到,其作用机理很复杂,对大坝的自振特性造成了较大影响,加之混凝土大坝各个坝段之间的填充物以及大坝进行二次加固时对加固面的灌浆,5#坝段的传递函数也不稳定,给对比分析带来很大的麻烦,因此5#、14#坝段在8个地震发生时三分向传递函数中的峰值位置和峰值个数都不一致。由于108.5m高程贯穿裂缝经过灌浆、插筋及上游防渗等加固措施的专门处理后,大坝顺河和坝轴向的整体性有很大提高,从平均值曲线来看,与无贯穿裂缝大坝的上下坝体传递函数有一定相似性,尤其是顺河向的相似度很高,由此可见,灌浆、插筋及上游防渗等加固措施还是发挥了很好的作用。但从轴向的传递函数平均值来看,14#坝上坝段对下坝段在8—15Hz之间的放大效应明显高于5#坝,与完整性较好的5#坝体有较大的差别,可见14#坝段的整体性还是不够的。同样,从竖向的传递函数平均值来看,14#坝段竖向传递函数的离散性明显高于5#坝段,且14#坝上坝段对下坝段在18Hz左右地震动的放大效应明显高于5#坝。这足以反映出,对重压下的大坝贯穿裂缝进行灌浆、插筋及上游防渗和下游沿裂缝增设混凝土护墙等加固措施后,很难达到整体固结的效果,大坝的竖直向整体性依然较差。

通过综合分析5#坝段和14#坝段在小震下的傅里叶谱和传递函数,我们认为有贯穿性裂缝的14#坝段经过加固处理后,经过50多年运营,上下坝体依然保持原有的整体性。在多次小震作用下,中低频振动特性没有明显偏离,表明上下坝体裂缝原有的结合面没有遭受明显破坏。但在强震动作用下,当地震作用超过坝体间摩擦或固结力时,14#坝段坝体贯穿裂缝可能会首先发生破坏,它们仍然是大坝未来地震时的薄弱环节和潜在隐患。

4 结论

基于新丰江水库大坝强震动台阵中5#和14#坝段的监测数据,利用傅里叶谱和传递函数,对108.5m高程贯穿裂缝上下坝体的稳定性进行分析,初步得到了以下结论:

小震作用下,14#坝段108.5m高程贯穿裂缝上下坝体顺河向和坝轴向的整体性高于竖向。在顺河向和坝轴向的振动性方面,与5#坝段相比,14#坝段的振动性没有明显偏离,说明上下坝体裂缝原有结合面的整体性没有遭受明显破坏,稳定性没有被打破,由于下游沿裂缝的混凝土墙的保护作用,顺河向的整体性略优于轴向;但在竖向振动性方面,在小震作用下,14#坝段和5#坝段的傅里叶谱和传递函数存在明显差别,14#坝段的整体性和稳定性明显弱于后者,在未来强震动作用下,14#坝段坝体贯穿裂缝仍然是大坝的薄弱环节,应加强监测跟踪,在可能的情况下,采用新方法和新技术进行进一步加固。

参考文献

- 丁浩, 2008. 土层结构对场地传递函数的影响研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 李敬, 杨建安, 李志军等, 2014. 新丰江水库大坝地震反应专用台阵介绍. 中国西部科技, 13(7): 22—24.
- 李雪林, 2008. 新丰江水电站坝基排水孔淤积处理. 广东科技, (24): 172—173.
- 林俊高, 许岳城, 杨文元, 1998. 新丰江大坝动力特性研究与安全评估. 大坝与安全, (1): 25—32.
- 首培杰, 刘达, 孙玉莲, 1988. 新丰江坝振动性状的研究. 世界地震工程, (3): 20—33.
- 万永革, 2007. 数字信号处理的 MATLAB 实现. 北京: 科学出版社, 269.
- 翁昌瑜, 2010. 新丰江混凝土大头坝抗地震加固. 见: 国家能源局编. 中国水电 100 年 (1910—2010). 北京: 中国电力出版社, 250—253.

朱葳, 杨文元, 林俊高, 1998. 新丰江大坝振动监测与安全评估. 水力发电学报, (1): 47—58.

Research on Perfoliate Crack and It's Stability of the Xifengjiang Reservoir Dam

Song Xiaochun^{1, 2, 3, 4)}, Jiang Hui^{1, 2, 3)}, Wang Lixin^{1, 2, 3)}, Liu Zhi^{1, 2, 3)} and Zhu Min⁴⁾

1) Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China

2) Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China

3) Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Projects, Guangdong Province, Guangzhou 510070, China

4) Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, Hebei, China

Abstract On March 19, 1962, a strong earthquake of magnitude 6.1 occurred near the Xinfengjiang reservoir dam. It generated a 82m length perfoliate crack at the height of 108m at the dam sections from No. 13 to No 17. The perfoliate crack caused leakage of reservoir water. Although the dam has been reinforced, how the perfoliate crack develops after more than 50 years becomes the concerned focus at all levels of governments, experts and scholars. In this paper, the integrality and stability of the No. 14 dam body has been evaluated through comparative analysis by Fourier spectrum of seismic acceleration on the dam within and outside the perfoliate crack region and transfer function of the top and bottom dam section. By far, the perfoliate crack of the dam has no obvious deterioration yet, but the dam integrality is still not so good and will be the main potential weakness of the dam.

Key words: The Xinfengjiang reservoir dam; Perfoliate crack; Stability