

文章编号: 1000-7598 (2010) 11-3542-07

汶川地震对冶勒大坝影响分析

曹学兴¹, 何蕴龙¹, 熊 堃¹, 刘 斌²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 水利部农村电气化研究所, 杭州 310012)

摘 要: 冶勒大坝为沥青混凝土心墙堆石坝, 最大坝高 124.5 m, 坝址地震烈度高、地质条件复杂。该坝址距离“5.12”汶川大地震震中 258 km, 地震发生时坝区有强烈震感。坝上布置了由 9 台强震仪组成的强震监测台阵及埋设有较完整的大坝安全监测仪器, 在此次汶川地震中获得了较完整的地震记录和其他监测资料。通过对强震监测资料及地震前后大坝变形、应力、应变及渗流渗压等方面的分析, 考察汶川大地震对冶勒大坝工作性态产生的影响。分析结果表明, 地震对大坝整体的应力、应变、渗流渗压并未造成明显的不利影响, 但对大坝局部结构产生了一些不利的影响。总体而言, 整个大坝在遭遇 Ms8.0 级大地震之后, 外观无异常现象, 总体运行性态基本稳定。

关 键 词: 汶川地震; 堆石坝; 沥青混凝土心墙; 强震记录; 监测资料

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Effects of Wenchuan earthquake on Yele Dam

CAO Xue-xing¹, HE Yun-long¹, XIONG Kun¹, LIU Bin²

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

2. National Research Institute for Rural Electrification, Ministry of Water Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Yele Dam is a rockfill dam with an asphaltic concrete core wall. The maximum dam height is 124.5 m; and the geological conditions of the foundation are quite complex with a high degree of seismic intensity. The dam area was shocked strongly at an epicentral distance of about 258 km. There are 9 accelerographs and some other monitoring instruments on the dam. And they obtained comparatively complete records of the earthquake and other monitoring data during Wenchuan Earthquake. The effects of Wenchuan Earthquake on Yele Dam were studied based on the earthquake records and the analysis of the deformation, stress and strain, as well as seepage and osmotic pressure. Based on these analysis there had no significant adverse effects on the dam, but it still had some disadvantage effects on the partial structure of the dam. It was concluded that there was no exceptional appearance and the dam remained in normal working state after the Ms8.0 earthquake.

Key words: Wenchuan earthquake; rockfill dam; asphaltic concrete core; strong earthquake records; monitoring data

1 引 言

冶勒水电站是南桷河流域梯级开发的龙头水库工程, 水电站采用混合式开发, 主要由沥青混凝土心墙堆石坝等水工建筑物组成。水库总库容为 2.98 亿 m³, 正常蓄水位为 2 650 m。冶勒大坝坝址处于冶勒断陷盆地边缘, 由于坝址附近防渗土料天然含水率过高, 而坝址区雨季又过长, 雨量丰沛, 不利于土料的加工和填筑, 大坝采用沥青混凝土心墙坝型, 最大坝高为 124.5 m, 在同类坝型中国内最高、世界第三。大坝坝体填料分区由沥青混凝土心墙、上下游过渡层、坝壳主副堆石料等部分组

成, 上游坝坡为 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 3 级 4 m 宽马道)。右岸坝肩副坝坝轴线长约 300 m, 最大坝高 15 m, 为钢筋混凝土心墙堆石坝^[1]。大坝坝基左岸基岩埋藏较浅、河床及右岸地表覆盖层深厚, 最大厚度超过 420 m。针对左、右岸基础条件严重不对称的情况, 坝基采用了“混凝土防渗墙+水泥灌浆帷幕”进行基础防渗处理^[2], 对左、右岸和河床段结合其各自的地质特点, 采取不同的处理方法。大坝最大纵断面及监测仪器布置情况如图 1 所示, 最大横断面及监测仪器布置情况如图 2 所示。

冶勒大坝具有“坝高、基础覆盖层深厚、左右岸

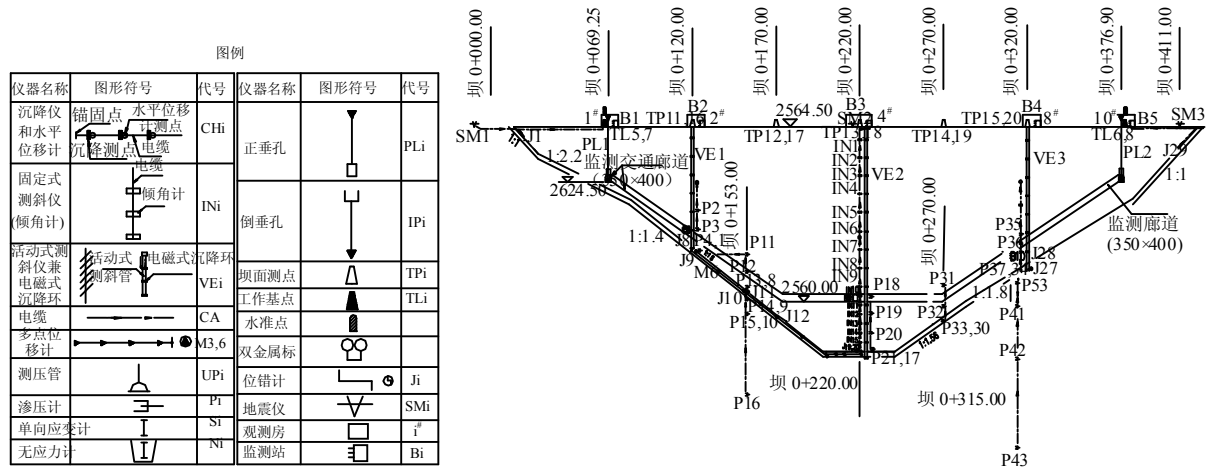
收稿日期: 2009-08-03

第一作者简介: 曹学兴, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事高坝结构设计领域方面的研究。E-mail: caoxxing@163.com

坝基严重不对称”等特点^[3], 且处于强地震波及区。自有历史记载以来, 工程区外围共发生 7 级以上强震 5 次, 6.0~6.9 级地震 13 次, 5.0~5.9 级地震 19 次。其中以 1786 年康定 7.50~7.75 级地震震级最大, 波及到库坝区的影响烈度达Ⅶ度, 其余地震对工程区的最大影响烈度均不过Ⅴ度。工程区及其周围未发生过 6 级以上地震, 仅 1972 年在坝址东南约 7 km 处发生过 4.10 级地震, 波及到库坝区的影响烈度在Ⅵ度以下。大坝地震设防烈度Ⅸ度, 设计地震加速度为 0.45 g。

2008 年 5 月 12 日汶川县境内发生了里氏 8.0 级的大地震, 震中烈度达Ⅺ度^[4], 在已收集的记录中, 最大加速度峰值达 976 gal, 地震动持续时间长

达 1 120 s^[5]。地震时冶勒坝区有强烈震感, 坝址距震中 258 km。根据国家地震局发布的“汶川地震灾区地震烈度分布图”结合监测到的坝体基岩地震加速度资料, 可以确定汶川地震时坝区地震烈度为Ⅵ度。冶勒大坝上布有由 9 台强震仪组成的强震监测台阵, 在此次汶川地震中获得了较完整的地震记录, 本文通过对强震监测资料及大坝变形、应力、应变及渗流、渗压等监测资料的分析, 考察汶川地震对冶勒大坝工作性态产生的影响, 并与 2008 年 8 月 30 日攀枝花地震对冶勒大坝的影响进行了简单的比较, 从而可以更好地反映出汶川地震对冶勒大坝的影响, 并对大坝震后的安全性进行了评价。



3 强震监测

3.1 强震仪及其布置

强震监测台阵由中国地震局哈尔滨工程力学研究所生产的 6 台 GDQJ-I 和 3 台 GDQJ-II 型固态地震动强度记录仪组成。根据大坝安全监测强震仪布置的原则^[6], 强震监测台阵 9 台强震仪的布置情况见图 1、2 所示。坝顶中央的 4[#] 和两边坝端的 1[#] 和 10[#] 强震仪, 最大横断面下游坝面约 3/4、1/2、1/4 坝高位置的 5[#]、6[#]、7[#] 强震仪, 主要监测主坝表面的地震反应; 副坝坝顶的 11[#] 强震仪主要监测右岸副坝的地震反应; 左岸灌浆平洞的 12[#] 强震仪主要监测左岸基岩的地震反应; 监测廊道内最大断面位置的 13[#] 强震仪主要监测沥青混凝土心墙附近的地震反应情况^[7]。

3.2 强震记录

汶川大地震期间有 6 台仪器正常工作, 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 M6.0~6.4 级地震 5 次, M5.0~5.9 级地震 2 次。第 1 次地震记录震级 Ms8.0 即为“5.12”汶川大地震的主震, 震中位于北纬 31°00′, 东经 103°24′, 震源深度为 14 km, 坝址距震中 258 km。其他记录为其余震, 最大余震为 5 月 25 日的 Ms6.4 地震, 震中位于北纬 31°54′, 东经 103°24′, 震源深度为 33 km, 坝址距震中 454 km。

图 3 给出了主震中大坝左岸灌浆平洞(主要监测左岸基岩的地震反应)与最大断面的坝顶 3 向加速度时程曲线。各方向加速度总体表现出了 2 个峰值。另外, 可以明显地看到大坝对地震波的放大作用, 且顺河向放大倍数最大, 竖直向最小, 此次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。

4 地震对大坝变形的影响

4.1 坝体表面变形

4.1.1 水平位移

图 4 (a) 给出了地震前后大坝表面水平位移分布情况。以下对上游马道、坝顶、下游 2624.5 m 高程马道水平位移变化情况详细地分析。

(1) 上游马道。在 5 月 5 日至 5 月 23 日期间, 库水位上升 5.49 m, 正常情况下随着水位的上升, 坝体会有向下游的位移, 从图 4 (a) 中可以看, 到马道左岸和右岸大多测点发生向上游的位移, 只有

中间部位测点有向下游的位移且量值很小。向上游位移最大变化量为 3.61 mm, 发生在坝体左岸。

(2) 坝顶。坝顶水平位移中部大于两岸, 震后水平位移相对震前总体有向上游位移趋势, 但量值不大, 5 月 21 日实测到向上游最大位移变化量为 5.68 mm。

(3) 下游 2624.5 m 高程马道。该马道水平位移呈河床大而两岸小的分布特点, 地震前后变化量值介于 -2.71~1.28 mm 之间, 受地震的影响不大。

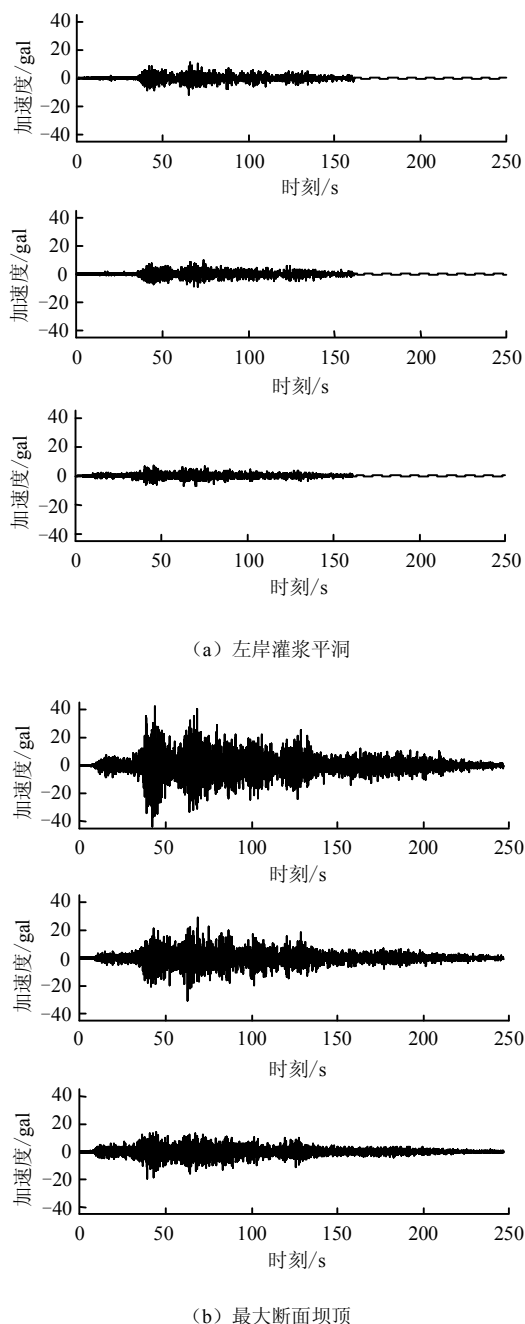


图 3 “5.12”汶川地震大坝 3 向加速度时程曲线
Fig.3 Accelerograms in transverse, longitudinal and vertical direction in 5.12 Wenchuan earthquake

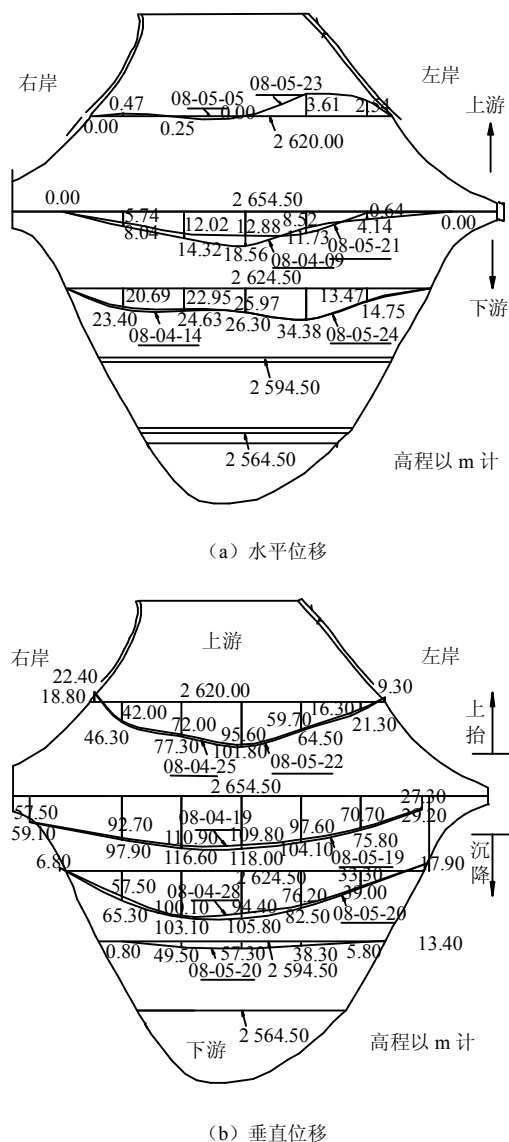


图 4 地震前后大坝表面位移示意图 (单位: mm)

Fig.4 Distribution of displacements on the surface of the dam before and after the earthquake (unit: mm)

通过上面的分析可知, 尽管在监测期间库水位上升, 但在地震作用下坝体总体上相对震前却产生了向上游的位移, 只是位移量值很小, 可见地震对坝体表面水平位移产生一定的影响, 但影响较小。

4.1.2 垂直位移

图 4 (b) 给出了地震前后大坝表面垂直位移的分布情况。以下对上游马道、坝顶、下游 2 624.5 m 高程马道垂直位移变化情况详细地分析。

(1) 上游马道。由图 4 (b) 可以看出, 上游马道除两岸测点有上抬现象外, 其余均有沉降, 且河床部位沉降量大于两岸, 震后相对震前所有测点沉降均有增大。最大沉降变化量为 13.53 mm, 发生在大坝最大断面。

(2) 坝顶。坝顶各测点均有沉降, 且中部沉降

量大于两岸。震后相对震前沉降量在 1.60~8.20 mm 之间, 最大沉降变化量为 8.20 mm, 说明地震对该部位的垂直沉降有一定影响, 但影响较小。

(3) 下游 2 624.5 m 高程马道。下游 2 624.5 m 马道震后, 除两岸测点有上抬现象外, 其余均有沉降。最大沉降变化量为 11.40 mm, 发生在坝的最大断面, 最大上抬变化量为 13.30 mm。

通过上面的分析可知, 地震加速了坝体的沉降, 使坝体不同部位产生了新的不同的沉降, 但其量值较小, 地震并未对坝体垂直位移产生明显的不利影响。

4.2 坝体内部变形

4.2.1 沥青混凝土心墙变形

在坝体最大断面沿沥青心墙下游壁设置单向固定式测斜仪, 监测沥青心墙的上下游方向水平位移。图 5 为地震前后坝体最大断面心墙水平位移沿高程分布情况, 可见震后心墙向上游位移最大变化量出现在 2 618.0 m 高程, 变化值为 3.87 mm; 向下游位移最大变化量出现在 2 628.0 m 高程, 变化值为 6.78 mm, 2 548.0 m 高程心墙向下游位移变化量也相对较大。图中显示, 地震对沥青混凝土心墙的变形影响不大。

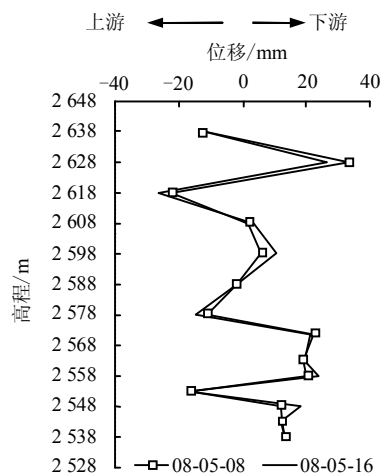


图 5 地震前后坝体最大断面心墙水平位移沿高程分布图

Fig.5 Distribution of horizontal displacements of the core on the largest section before and after the earthquake

4.2.2 沥青心墙与过渡料间位错变形

通过对大坝左岸断面 (距最大断面为 100 m)、最大断面、右岸断面 (距最大断面为 100 m) 的监测资料进行分析, 震后各断面位错计实测位错稳定, 与库水位关系不明显。地震前后测值基本无变化, 说明地震对沥青心墙与过渡料间的位错变形影响很小。

4.2.3 混凝土防渗墙变形

由于左岸基岩埋藏较浅,该部位防渗墙插入基岩内,应力变形情况较复杂,故在大坝左岸断面防渗墙内埋设有 4 支固定式测斜仪,监测该部位混凝土防渗墙沿顺河向及横河向的水平位移情况。图 6 为该断面混凝土防渗墙在地震前后水平位移分布情况。从图中可以看出,震后相对震前,防渗墙在顺河向 2 574.2 m 高程以上有向上游位移趋势,2 574.2 m 高程以下有向下游位移趋势;坝轴线方向有向左岸位移趋势。5 月 22 日实测向上游最大位移变化量为 11.03 mm,向下游最大位移变化量为 11.14 mm;向左岸最大位移变化量为 4.29 mm,说明地震对防渗墙的位移有一定影响。

4.2.4 过渡料、堆石料位移

在顺河向,地震后大部分测点有向上游位移趋势,少部分测点向下游位移,但量值均不大,且后期测值已渐趋于稳定。5 月 13 日实测向上游最大位移变化量为 15.00 mm,向下游最大位移变化量为 9.00 mm,可见地震并未对过渡料、堆石料水平位移造成明显影响。

地震后坝体内部垂直位移大部分有上抬趋势,震后与震前测值相比:2 625.0 m 高程大坝左岸断面最大上抬量为 26.00 mm,最大断面最大上抬量为 13.00 mm,右岸断面最大上抬量为 34.00 mm,2 597.0 m 高程大坝最大断面最大上抬为 3.00 mm,在汶川地震作用下过渡料、堆石料垂直位移总体上有上抬趋势。

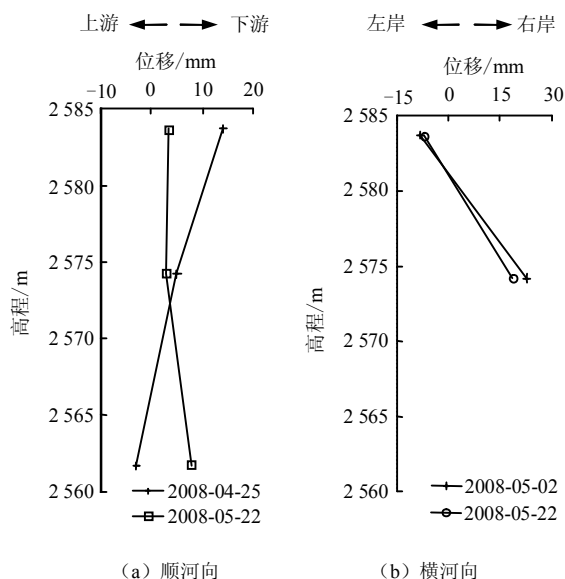


图 6 地震前后大坝左岸坝断面防渗墙水平位移分布图

Fig.6 Distribution of horizontal displacements on left abutment of the cutoff wall before and after the earthquake

5 地震对大坝应力、应变的影响

5.1 沥青混凝土心墙应力、应变

大坝左岸断面:该断面心墙应变在地震后整体上略向受压方向变化,仅在心墙下游侧 2 599.1 m 高程处某点向受拉方向变化,最大拉应变变幅为 78.00 $\mu\epsilon$,压应变最大变幅为 157.00 $\mu\epsilon$ 发生在 2 599.1 m 高程心墙上游侧处的一点。

大坝最大断面:该断面仅 2 563 m 高程心墙下游侧一点受拉,拉应变在 14 日增大到 39.2 $\mu\epsilon$,20 日又恢复到震前测值。2 548.0 m 高程心墙上游侧某点地震后向受压方向变化较大,最大变幅为 274 $\mu\epsilon$ 。其余应变计在地震前后变幅介于 -40~39 $\mu\epsilon$ 之间,且后期测值趋于稳定。

大坝右岸断面:该断面心墙应变计实测应变均为压应变,且随时间推移压应变有增大的趋势,与库水位有一定关系。地震后压应变总体有所增加,特别 2 600.0 m 高程应变计受地震影响变化较大,最大变幅为 210 $\mu\epsilon$ 。其余应变计变化较小,变幅在 0~-79 $\mu\epsilon$ 之间。

由此可见,汶川地震对沥青混凝土心墙整体应力应变影响较小,但对局部应力应变有一定的影响。

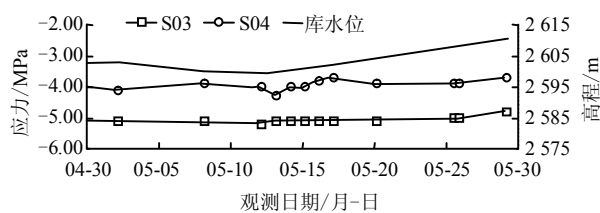
5.2 混凝土防渗墙应力、应变

图 7 分别给出了大坝左岸断面 2 575.5 m 高程处(S03 和 S04 坝轴距分别为 0-004.20、0-003.20)和最大断面为 2 504.5 m 高程处(S17 和 S18 的坝轴距分别为 0-004.20、0-003.20)地震前后防渗墙应力的变化情况。从图中可以看出,混凝土防渗墙应力在地震前后略有波动,主要是受到地震轻微影响所致,后期逐渐恢复稳定。分析认为,汶川地震对冶勒大坝混凝土防渗墙应力、应变影响较小,少数测点受地震影响测值有一定波动,而且后期测值都趋于稳定。

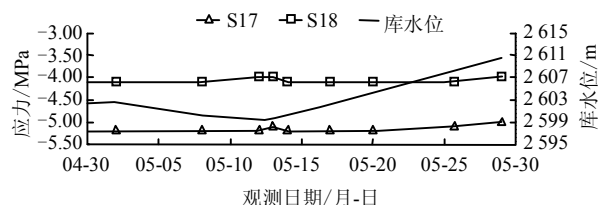
6 地震对大坝渗流的影响

6.1 渗流量

图 8 (a) 2008 年地震前后坝体坝基流量发展的过程。坝体坝基渗流量与库水位有关,地震后流量有所增大,主要是由于降雨引起,受地震影响较小。大坝下游总渗流量地震前后随时间变化的过程线见图 8 (b)。从图中可以看出,大坝下游总渗流量与库水位有关,受降雨影响明显,在地震前后略有波动,但总体上变化不大,后期随库水位上升有所增大,5 月 29 日实测流量为 95.37 L/s。通过分析可知该工程中渗流量受降雨影响明显,受地震影响较小。



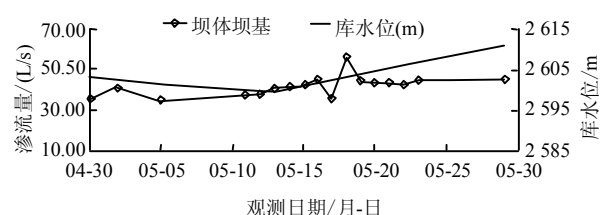
(a) 大坝左岸断面



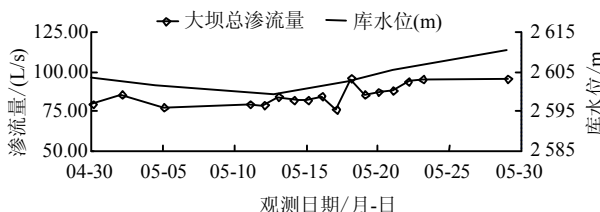
(b) 大坝最大断面

图 7 地震前后断面应力过程图

Fig.7 The stress the largest section before and after the earthquake



(a) 坝体坝基



(b) 大坝总渗流

图 8 地震前后大坝流量过程图

Fig.8 The dam before and after the earthquake

6.2 渗透水压力

(1) 大坝左岸渗透水压力

震后大坝左岸坡及坡脚实测水位在 2 587.0~2 546.0 m 高程之间, 低于设计渗控水位 2 600.0 m, 且地震前后水位测值变化较小, 说明左岸坡受地震影响很小。大坝左岸断面有 3 点实测渗压水位与库水位关系密切, 且 2 552.14 m 高程处防渗墙后测点渗压水位较防渗墙前测点的渗压水位高。分析认为, 主要是左岸存在地下承压水, 且基岩卸荷裂隙发育, 绕坝渗流水与地下水叠加所致。虽然该部位在地震前后测值未发生大的波动, 但在今后的监测工作中应注意其发展趋势。

(2) 大坝右岸渗透水压力

地震前后, 右岸渗压水位总体上变化不大, 地震并未对右岸防渗系统整体性能造成明显的不利影响。

(3) 河床部位渗透水压力

河床部位防渗墙上游侧渗压水位与库水位同步, 下游侧基础部位渗压与库水位关系不明显, 受库水位影响较小; 基础深部渗压受库水位影响明显, 主要是由于基础深部绕渗引起, 地震前后变化较小。防渗墙下游侧建基面埋设的渗压计实测压力变化很小, 坝基扬压系数很小, 说明坝基排水系统工作正常, 沥青心墙防渗效果显著。

通过上面的分析可知, 虽然地震对坝体局部渗透水压力有一定影响, 但总体上地震对大坝的渗透水压力影响不大, 大坝防渗系统工作正常, 防渗效果显著。

7 攀枝花地震对大坝的影响

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里氏 6.1 级地震, 主震后发生多次余震, 最大余震为 8 月 31 日发生的 5.6 级地震。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。图 9 为最大断面的坝顶 3 向加速度时程曲线, 与图 3 (b) 记录的同位置的汶川地震 3 向加速度时程曲线相比, 攀枝花地震峰值加速度和地震动持时都要小很多。通过比较经历攀枝花地震后, 冶勒大坝变形、应力、应变及渗流渗压等方面监测数据较震前基本没有变化。

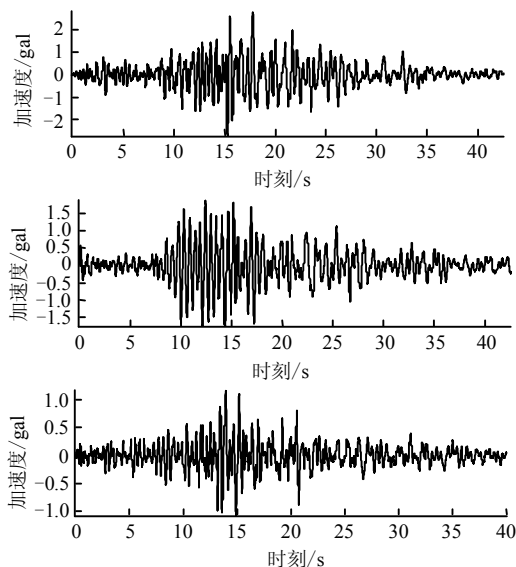


图 9 攀枝花地震大坝坝顶 3 向加速度时程曲线

Fig.9 Accelerograms in transverse, longitudinal and vertical directions of the crest in Panzhihua Earthquake

综上所述可知, 尽管冶勒大坝距汶川地震和攀枝花地震震中距相差不大, 但两次地震对大坝的影响是不同的。冶勒大坝基本上没有受到攀枝花地震的影响, 而汶川地震时坝址区地震烈度为VI度, 大坝工作性态一定程度上受到汶川地震的影响, 但并未产生明显不利影响。

8 结 论

(1) 冶勒大坝强震监测台阵在“5.12”汶川大地震期间共记录了9次地震, 其中主震为Ms8.0级地震, 最大余震为Ms6.4级地震。另外, 在大坝地震实测记录资料中非常罕见的是: 汶川地震主震冶勒大坝地震记录持续时间较长, 地震动持续时间长达200 s。

(2) 汶川地震发生后及时对大坝外部进行了巡视检查, 其中右岸排水廊道内一个排水孔流量偏大, 此外无其他异常情况。5月13日检查时发现, 坝趾右岸施工廊道交通洞上部出现轻微掉块, 分析认为是由于下雨及削坡处理造成, 无其他异常情况。

(3) 汶川地震后大坝坝体位移变化趋势正常, 由于受地震的影响部分测点坝体位移变化趋势异常。地震对大坝整体的应力、应变、渗流渗压并未造成明显的不利影响, 但受地震影响部分渗压计、应变计等测值出现异常。

(4) 由于震中距较远, 攀枝花地震基本没对冶勒大坝工作性态产生影响。

(5) 根据地震后对冶勒大坝的巡视检查情况以及对强震监测资料和安全监测资料的详细分析, 认为“5.12”汶川发生的里氏8级特大地震及其余震, 由于震中距离坝址较远(约258 km), 对冶勒大坝的整体结构影响较小, 仅对大坝局部结构产生了一些不利的影响。总体而言, 经历汶川大地震之后冶勒大坝运行性态基本稳定, 情况基本正常。

参 考 文 献

- [1] 何顺宾, 胡永胜, 刘吉祥. 冶勒水电站沥青混凝土心墙堆石坝[J]. 水电站设计, 2006, 22(2): 46—53.
HE Shun-bin, HU Yong-sheng, LIU Ji-xiang. Yele hydropower station asphalt concrete core rockfill dam[J]. **Design of Hydroelectric Power Station**, 2006, 22(2): 46—53.
- [2] 陈绪高. 冶勒水电站沥青混凝土心墙堆石坝监测设计[J]. 四川水力发电, 2003, 22(4): 50—53.
CHEN Xu-gao. The monitoring design of Yele hydropower station asphalt concrete core rockfill dam[J]. **Sichuan Water Power**, 2003, 22(4): 50—53.
- [3] 李庆华. 冶勒水电站沥青混凝土心墙堆石坝原型观测设计[J]. 四川水力发电, 2004, 23(1): 99—102.
LI Qing-hua. The prototype monitoring design of Yele hydropower station asphalt concrete core rockfill dam[J]. **Sichuan Water Power**, 2004, 23(1): 99—102.
- [4] 陈生水, 霍家平, 章为民. “5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 795—801.
CHEN Sheng-shui, HUO Jia-ping, ZHANG Wei-min. Analysis of effects of “5.12” wenchuan earthquake on Zipingpu concrete face rockfill dam[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 795—801.
- [5] 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 Ms 8.0 Wenchuan earthquake in Sichuan province[J]. **Earthquake Research In Sichuan**, 2008, 4(4): 25—29.
- [6] DARBRE G R. Strong-motion instrumentation of dams[J]. **Earthquake Engineering and Structure Dynamics**, 1995, 24: 1101—1111.
- [7] 熊堃, 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.