

乌鲁瓦提面板砂砾石坝安全监测分析

韩艳红¹, 龙智飞²

(1. 乌鲁瓦提水利枢纽工程建设管理, 新疆 和田 848000; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 乌鲁瓦提大坝是国内已建面板砂砾石坝第一高坝. 工程配备了较为全面的监测仪器, 水库蓄水至今已进行了多年的观测. 在介绍埋设在混凝土面板砂砾石坝中的渗流、沉降变形以及面板应力应变等各种监测仪器的作用和功能的基础上, 通过对乌鲁瓦提面板坝监测资料全面系统的计算分析, 评价了大坝的运行性状. 目前大坝沉降已基本稳定, 大坝渗流状况发展趋势良好. 经过多年高低水位的循环运行, 大坝结构性态变化正常, 处于安全运行状态. 本文为其它工程监测仪器的埋设及相关监测数据的分析提供了借鉴与参考.

关 键 词: 乌鲁瓦提; 面板坝; 仪器埋设; 监测分析; 安全

中图分类号: TV698.1:TV641.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)01-0062-07

乌鲁瓦提水利枢纽工程位于新疆和田地区和田河支流喀拉喀什河中游段, 是该河的控制性工程, 具有灌溉、发电、防洪、改善生态等综合效益, 坝址距和田市 71 km, 距乌鲁木齐市 1 671 km, 枢纽以上控制流域面积为 19 983 km², 约占全河流域面积的 90%, 控制全河径流量约 97%. 该工程是国家重点水利工程, 也是水利部重点科技项目“高混凝土面板砂砾石坝关键技术研究”的重点研究对象^[1-3]. 大坝为混凝土面板砂砾石坝, 坝顶高程 1 967.00 m, 最大坝高 133 m, 是我国已建成同类坝型中的第一高坝^[4-5]. 工程枢纽由主坝、副坝、溢洪道、泄洪排砂洞、冲砂洞、发电引水洞、发电厂房、升压变电站等主要建筑物组成, 工程等次为 II 等, 主要水工建筑物级别为 2 级. 水库正常蓄水位 1 962.00 m, 100 年一遇洪水设计, 设计洪水位 1 962.65 m; 2000 年一遇洪水校核, 校核洪水位 1 963.29 m, 总库容 3.336 亿 m³, 电站装机总容量 60 MW. 主坝工程于 1995 年 8 月 1 日正式开工, 1997 年 9 月截流, 1998 年 8 月下闸蓄水, 2002 年 9 月通过单位工程完工验收. 2003 年 1 月, 工程通过竣工初步验收, 2007 年完成竣工验收技术鉴定工作. 根据混凝土面板坝工程特性和实际情况, 该面板坝设置了较为全面的监测系统^[6-7], 包括大坝渗流、变形、应力应变监测. 部分测点布置见图 1 和图 2.

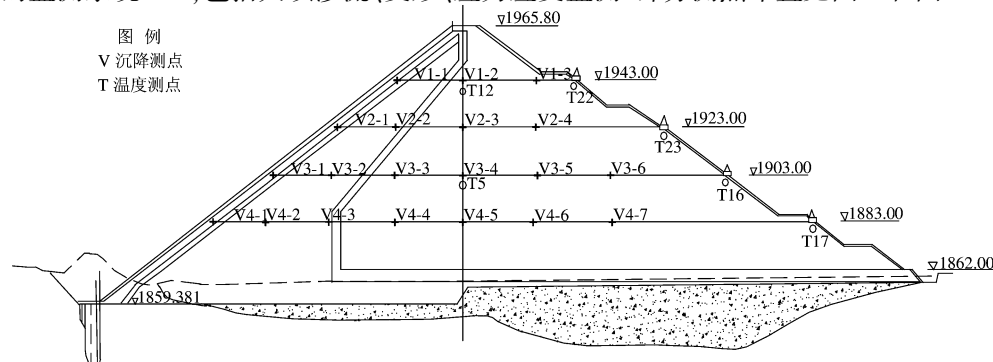


图 1 大坝典型断面仪器布设

Fig. 1 Instrumentation arrangement in typical cross-section of dam

收稿日期: 2009-03-25

基金项目: 国家“973”项目(2007CB714103)

作者简介: 韩艳红(1975-), 女, 江苏徐州人, 工程师, 主要从事大坝安全监测方案的研究. E-mail: wlwthyh@126.com

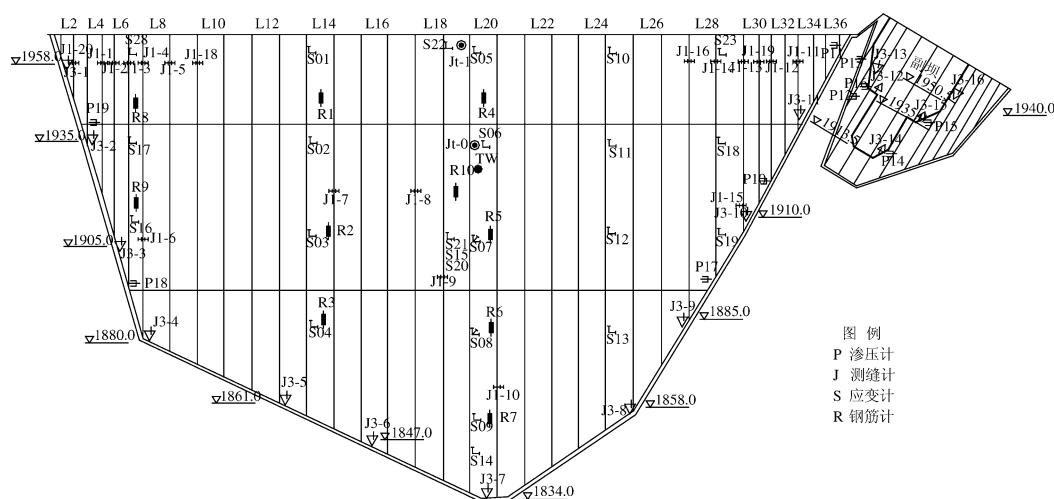


图2 面板监测仪器布置图

Fig. 2 Instrumentation arrangement in dam face

1 渗流监测

1.1 渗流监测项目及布置

该工程渗流监测项目包括渗压计、测压管及渗流量监测. 在主坝河床段 0+147 断面埋设 9 支渗压计, 在该断面附近埋设了 6 支测压管. 主、副坝混凝土面板各埋设 5 支渗压计, 左、右坝肩分别布置 4 支测压管, 左岸交通洞内布置 2 支测压管, 厂房区的上游侧和右侧各布置 2 支测压管. 对主、副坝之间的下游山坡和溢洪道泄槽左边墙外侧的山坡两处渗漏点进行渗流量观测.

1.2 渗流分析

1.2.1 主坝 根据多年渗流观测资料分析, 主坝各支渗压计工作性态正常, 渗压计水位与库水位的正相关性较明显, 渗流压力自上游向下游逐步递减, 符合一般渗流规律, 各点渗流压力变幅较小, 见表 1. 图 3 为 1998 年蓄水时至 2008 年底 P7 和 P9 渗压计水位与库水位过程线图. 从过程线看, 2003 年后渗流压力明显降低. 可见, 2003 ~ 2004 年上游面板维护处理的效果显著, 近几年渗流压力较为稳定, 个别测点水位逐年有所降低, 可能与上游淤积、渗流条件改善有关. 另外埋设于主坝的各支测压管水位均与库水位的相关性较好, 且变幅较小. 2008 年度各支渗压计、测压管的水位特征值见表 1 和表 2, 可见, 主坝各部位渗流压力都较小, 面板及坝基帷幕灌浆防渗效果较好.

表 1 各渗压计测值统计

Tab. 1 The measured values of osmometers

(单位: m)

项 目	库 水 位	主坝 0+147 断面								
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
最大值	1 962.09	1 852.29	1 852.49	1 856.00	1 859.12	1 856.94	1 856.97	1 856.97	1 857.21	1 856.77
最小值	1 923.66	1 851.45	1 851.76	1 855.6	1 858.62	1 856.22	1 856.48	1 856.44	1 856.98	1 856.45
变 幅	38.43	0.84	0.73	0.40	0.51	0.73	0.49	0.53	0.23	0.32

项 目	库 水 位	主坝面板			副坝面板	
		P10	P11	P17	P14	P16
最大值	1 962.09	1 928.36	1 950.78	1 893.95	1 932.35	1 939.82
最小值	1 923.66	1 926.97	1 948.92	1 893.69	1 919.36	1 938.73
变 幅	38.43	1.39	1.86	0.26	12.99	1.09

注: P1 ~ P5 位于坝轴线上游侧, 轴距分别为 217.5、216.0 m、193.8、174.6 和 70.0 m; P6 位于坝轴线; P7 ~ P9 位于坝轴线下游侧, 轴距分别为 50.0、100.0 和 150.0.

表 2 各测压管测值统计

Tab. 2 The measured values of piezometer tubes

(单位: m)

项 目	库 水 位	左 坝 肩		左岸交通洞		右岸绕渗	
		UP_1	UP_2	UP_5	UP_6	UP_7	UP_10
最大值	1 962.09	1 930.68	1 970.44	1 880.58	1 878.03	1 904.44	1 856.35
最小值	1 923.66	1 898.78	1 902.30	1 878.31	1 872.87	1 902.30	1 855.70
变 幅	38.43	31.90	5.14	2.27	5.16	5.14	0.65

项 目	库 水 位	主坝 0+190 断面附近				厂 房 区			
		UP_11	UP_13	UP_14	UP_16	UP_17	UP_18	UP_19	UP_20
最大值	1 962.09	1 856.57	1 855.72	1 856.56	1 856.07	1 855.94	1 856.25	1 856.47	1 854.53
最小值	1 923.66	1 856.40	1 855.29	1 856.11	1 855.74	1 855.62	1 855.48	1 855.71	1 853.53
变 幅	38.43	0.17	0.43	0.45	0.33	0.32	0.77	0.76	1.00

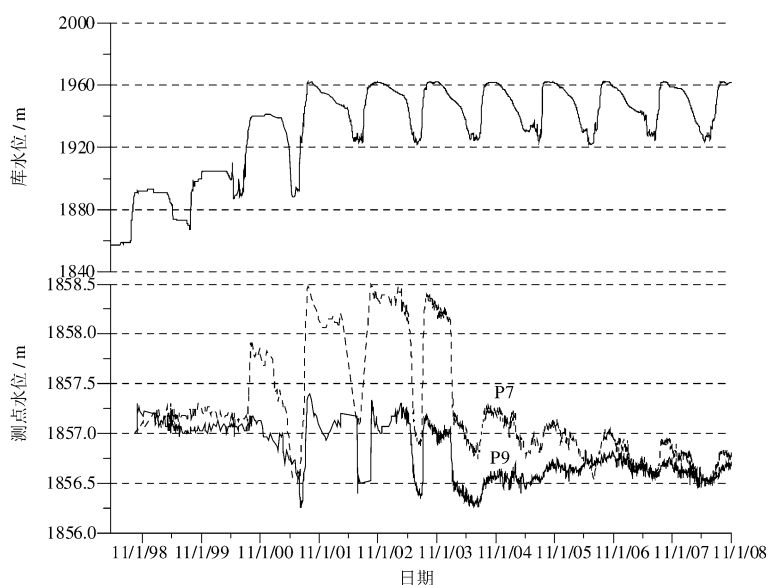


图 3 P7, P9 测点水位与库水位过程线

Fig. 3 Water-level hydrographs of P7, P9 and reservoir

1.2.2 副 坝 靠近帷幕灌浆及基岩面线的 P14 点测值波动较大, 渗流压力与库水位的变化呈相关性, 但变幅较大, 远大于主坝帷幕灌浆及面板后其他测点的渗流压力变幅, 反映该部位防渗存在薄弱环节, 可能与坝基防渗帷幕灌浆有关. 其他测点测值均较小.

1.2.3 两 坝 肩 左坝肩 UP_1 和 UP_2 测点水位与库水位相关线见图 4.

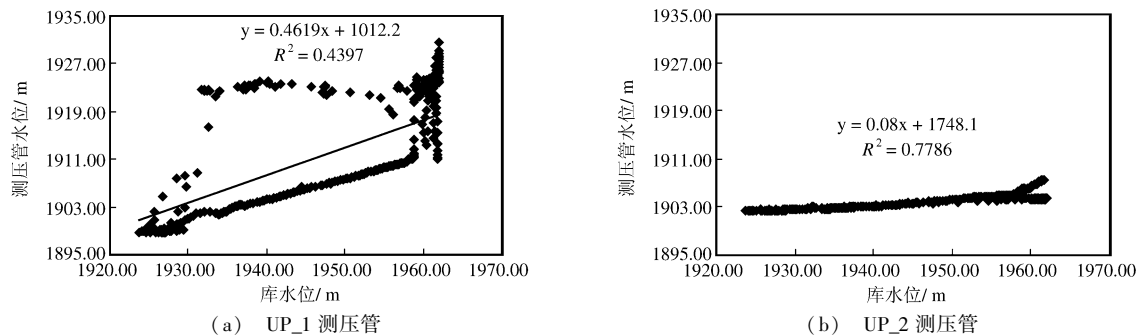


图 4 左岸绕渗测压管水位与库水位相关线

Fig. 4 The level related chart of the left bank piezometer tubes and reservoir

UP_1 测点水位变幅达 31.90 m,同期库水位变幅 38.43 m. UP_2 测点水位相对变化较小,为 5.14 m. 这两支测压管水位与库水位相关性都较好,反映了左坝肩存在绕渗现象. 从图 4 中可看出当库水位达到 1 958.00 m 左右时测压管水位有上翘现象,表明左坝肩在此高程左右存在渗流薄弱环节.

右岸测压管 UP_7 水位与库水位相关性较好,水位变幅 5.14 m,相对库水位变化较小,且目前该测点水位变化相对稳定,反映右岸绕渗现象较为稳定,并无向不利方向发展的趋势.

1.2.4 左岸交通洞及厂房区 左岸交通洞两测压管水位变化规律较为一致,其水位变化与库水位不相关.

1.2.5 渗流量 坝后 1 号渗水点渗流量过程线(见图 5)表明,渗流量主要受库水位影响,近期有减小趋势,渗流量变化正常;最大渗流量 2.46 L/s,最小渗流量 0.001 L/s. 2 号渗水点位于副坝后,该渗水点要等库水位上升到 1 959.00 m 高程以上才出现渗水,并且渗水量及变幅均很小,库水位达到 1 962.00 m 时,最大渗流量仅为 0.35 L/s,过程线与 1 号渗水点相似,但受库水位年周期变幅影响小.

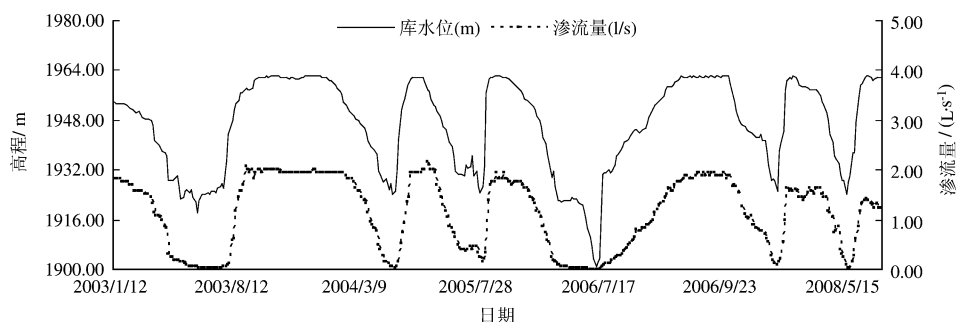


图 5 渗流量与库水位过程线

Fig.5 The seepage discharge and reservoir water level: hydrographs

1.2.6 渗流安全评价分析 大坝各部位渗流监测数据的分析表明,大坝经过了七年的运行考验,渗流性态正常,渗透稳定性满足安全运行要求. 但副坝和左坝肩局部仍存在渗流薄弱环节,运行中应加强巡视检查,必要时采取适当措施予以解决.

2 大坝变形及应力应变监测

2.1 变形监测仪器布设及主要监测项目

为监测坝体内部沉降,分别在 1 883.00,1 903.00,1 923.00 及 1 943.00 m 高程安装了 74 套水管式沉降计;在 1 903.00 和 1 923.00 m 高程共布设了 10 支引张线式水平位移计,主要用于监测大坝水平位移;在主、副坝混凝土面板与趾板接合处沿周边缝布置了 16 组三向测缝计,其中主坝 11 组,副坝 5 组,主要用于监测周边缝变形情况;在大坝面板的不同部位共埋设 20 支单向测缝计,主要用于监测大坝面板的板间缝变形情况;在面板的不同高程分别埋设 22 组二向应变计、2 组三向应变计、20 支无应力计和 10 支钢筋计,主要用于监测混凝土面板应力应变.

2.2 大坝变形及应力应变监测数据的整编分析

2.2.1 坝体沉降 根据监测显示,施工期坝体最大沉降量 374 mm^[8],处于原河床最深处断面. 至 2008 年,运行 7 年后,蓄水期坝体最大沉降量 65 mm,同样仍处于原河床最深处断面.

根据国内外面板堆石坝的监测统计结果^[9](见表 3)分析,施工期坝体最大沉降与坝高之比一般以不超过 0.5% 为正常,而乌鲁瓦提大坝施工期的最大沉降与坝高之比相对较小,说明坝体施工质量较好.

假设面板与周边趾板为固接,面板无平移且坡比维持在 1 : 1.6,测点与面板结合紧密,仅考虑由沉降在面板法向方向引起的面板挠度 $\delta = V \cos \alpha$, V 为测点的沉降, α 为面板的坡角, $\tan \alpha = 1/1.6$. 理论计算与实践表明,面板的挠度变形一般在 0.4 ~ 0.6 倍坝高处最大. 乌鲁瓦提大坝面板最大挠度位于 1 903 m 高程附近较

为合理,约 0.5 倍坝高处.

表 3 国内外混凝土面板堆石坝的最大沉降计算结果比较

Tab.3 Comparison of world CFRD largest settlement calculation results

坝 名	坝 高 / m	填 筑 料	最大沉降/ mm		最大沉降/坝高		施工期垂直压 缩量/ MPa
			施工期	蓄水期	施工期	蓄水期	
安其卡亚	140	闪长岩	630	140	0.45%	0.10%	138 ~ 170
萨尔瓦兴娜	148	砂砾石	400	100	0.27%	0.07%	49 ~ 393
乌鲁瓦提	133	砂砾石	374	65	0.31%	0.05%	125 ~ 299

主坝混凝土面板分别在 1 893.00 m 和 1 938.00 m 高程设置水平施工缝,分三期施工:一期混凝土面板于 1998 年 4 ~ 5 月施工,二期混凝土面板于 1999 年 4 ~ 7 月施工,三期混凝土面板于 2000 年 4 ~ 6 月施工. 0+147断面挠度分布见图 6,挠度计算时各沉降测点的沉降值按测点所处面板施工完成后的沉降计算.

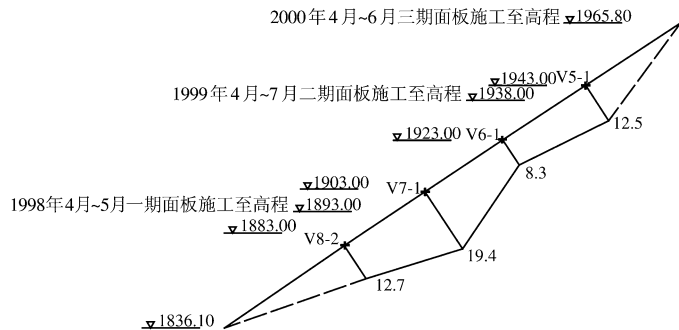


图 6 0+147 断面挠度分布(库水位 1 961.74 m)(单位: cm)

Fig. 6 Deflection distribution of 0+147 section (reservoir level 1 961.74 m) (unit: cm)

2.2.2 面板应力应变 一期面板 1 883.00 m 高程以下的测点在初期低水位下处于拉应力状态或拉压交替状态. 在高水位运行时,淹没于水下,温度变化小且基本稳定在某一数值,测点都转为压应变状态,随蓄水过程压应变有增加趋势;二期面板中间板块测点处于拉、压交替状态,其余各点在高水位运行后均处于压应变状态;左、右岸坡段的测点的水平向应变处于拉应变状态;第三期面板的测点在近期高水位运行时,由于处于水位变动区,温度变化明显,除 S23-1 点处于数值较小的拉压交替状态外,其余各点基本处于压应变状态. 总体来看,在高水位下,目前各点的应变基本稳定.

与其他面板坝的最大应变以及该水库之前的应变进行比较见表 4^[11-12]. 与其他面板坝相比,乌鲁瓦提面板坝面板的顺坡向压应变相对较低,水平向压应变基本相当,但拉应变相对较大. 而拉应变大会造成面板开裂,不利于面板的防渗.

表 4 最大应变统计对比^[11-12]

Tab.4 Comparison of world CFRD largest strains

坝 名	堆石类型	坝 高 / m	顺 坡 向		水 平 向	
			张拉/ $\mu\epsilon$	压缩/ $\mu\epsilon$	张拉/ $\mu\epsilon$	压缩/ $\mu\epsilon$
安其卡亚	角页岩	140		400		400
	闪长岩					
默 其 松	流纹岩	94	140	100	35	70
塞 沙 那	石英岩	110	25	300		380
塞格雷多	砂砾石	145		340		
萨尔瓦兴娜	砂砾石	148		150	90	130
乌鲁瓦提	砂砾石	133	246	177	199	394
			352	265	430	354

对比2004年应变观测最大值可以看出,目前顺坡向张拉和压缩应变值均有所增加,水平向张拉也有所增加,水平向压缩相差不大,建议进一步观测,加强面板的检查和对比分析^[10]。

2.2.3 周边缝位移 由于面板与趾板分别位于碾压砂砾石坝体与基岩之上,基础性质不同,在水压力作用下,会产生较其他接缝位移量大的相对位移,是面板坝防渗的薄弱环节。从观测结果可见:大多数测点的开合度、剪切位移、沉降受库水位变化影响较明显,基本上随库水位的升高而增大,随库水位的降低而略有减小,并以竖向变形最大,张开变形次之,剪切变形最小,符合周边缝变形的一般规律。

主坝开合度基本呈张开状态,测值与历年同期相比较,变化非常小,表明周边缝的开合度值已基本稳定。大多数测点的剪切位移无明显的趋势性变化,并且大多数测点的剪切变形方向均指向河床,剪切位移方向正常。沉降变形在二期面板左、右两岸相对较大。根据国内外几座比较典型的面板堆石坝的对比分析结果来看(见表5^[13]),乌鲁瓦提面板坝周边缝的开合度、沉降变形相对较小,周边缝的整体变形量正常。

表5 面板周边缝位移情况对比表

Tab.5 Comparison of world CFRD peripheral joint displacements

坝 名	坝 高 / m	堆石类型	最大位移量/mm		
			开 合 度	沉 降	剪 切
成 屏	74.6	凝灰岩	11.1	22.6	-18.6
安其卡亚	140	角闪岩闪长岩	125.0	106.0	15.0
萨尔瓦兴娜	148	砂砾石	9.7	19.5	15.4
乌鲁瓦提	133	砂砾石	8.49	24.2	7.36

2.2.4 板间缝位移 乌鲁瓦提大坝板间缝在施工期和蓄水期的板间缝均处于张拉状态,大多数测点的位移、温度与库水位关系明显,库水位升高,温度降低,板间缝位移量增大,库水位降低,则相反,这可能是由于混凝土干缩等因素造成的。位于一期面板的板间缝由于布置高程较低,测点温度基本不受库水位影响,板间缝变化不大。二期面板板间缝中,位于中央板块有两测点测值也基本不受库水位的影响,且面板变形基本稳定,测值也基本稳定,而位于右岸的一支测缝计受库水位影响较大,板间缝开度与库水位正相关,与测点温度负相关,比岸坡附近其它板块的板间缝开度值大。三期面板测点由于埋设高程较高,板间缝变化受温度的影响较明显,呈现起伏变化,且与测点温度呈现负相关,位于同一面板沿不同高程布置的单向测缝计中,二期面板板间缝变形大于三期面板,从各测点的变化趋势看,高水位运行对板间缝的影响不大。

3 结 语

根据坝体变形、沉降、面板应力应变以及渗流监测资料分析表明,目前大坝沉降已基本稳定;面板的应力与同类工程相比,压应变较小,拉应变相对较大,应加强面板的观测和维护;大坝周边缝变化符合一般变形规律,变形正常;大坝坝基渗透压力较小,与库水位相关性较好,周期性变幅较小;副坝和左坝肩局部仍存在渗流薄弱环节,总体上朝不利方向发展的趋势,目前变化较为稳定;相同库水位下,位于主、副坝间下游坡的渗流量呈降低趋势,综合反映了大坝渗流状况呈向好的趋势发展。乌鲁瓦提大坝经过多年高低水位的循环运行,大坝结构性态变化正常,处于安全运行状态。

参 考 文 献:

- [1] 陈生水. 高混凝土面板砂砾石坝关键技术研究[J]. 中国水利, 2004(22): 73-74. (CHEN Sheng-shui. Key technology research of high CFRD[J]. China Water Resources, 2004(22): 73-74. (in Chinese))
- [2] 王世江. 乌鲁瓦提水利枢纽工程建设综述[J]. 水利水电技术, 2003, 34(12): 1-3. (WANG Shi-jiang. Summary of Wuluwati Hydropower project construction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(12): 1-3. (in Chinese))
- [3] 樊玉霞. 水资源开发和利用与社会发展研究——以新疆乌鲁瓦提水利枢纽工程为例[J]. 水利经济, 2006, 24(1): 68-70. (FAN Yu-xia. Water resources development, utilization and social development research in the case of Wuluwati water

- control project[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2006, 24(1): 68-70. (in Chinese))
- [4] 王安民, 崔 东. 乌鲁瓦提水利枢纽主要工程地质问题及处理[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(7): 1147-1149. (WANG An-ming, CUI Dong. Primary engineering geological for Wuluwati water resources pivotal project and their treatment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(7): 1147-1149. (in Chinese))
- [5] 新疆水利水电勘测设计研究院. 乌鲁瓦提水利枢纽工程竣工初验设计工作报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆水利水电勘测设计研究院, 2002. (Xinjiang Uygur Autonomous Region Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower. Inspection report on the preliminary design work completed of Wuluwati Hydropower [R]. Urumchi: Xinjiang Uygur Autonomous Region Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, 2002. (in Chinese))
- [6] 吴高平, 韩艳红, 李晓丽. 乌鲁瓦提水利枢纽工程大坝安全监测与水文测报自动化系统[J]. 水利水电技术, 2003, 34(12): 58-59. (WU Gao-ping, HAN Yan-hong, LI Xiao-li. Dam safety monitoring and hydrologic forecasting automation system of Wuluwati Hydropower [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(12): 58-59. (in Chinese))
- [7] 刘广林, 张新太, 柳海鹏, 等. 新疆乌鲁瓦提水利枢纽工程管理自动化系统[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(2): 6-12. (LIU Guang-lin, ZHANG Xin-tai, LIU Hai-peng, et al. Management automation system of Wuluwati Hydropower [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2006, 30(2): 6-12. (in Chinese))
- [8] 杨长征, 王 钧, 洪迎东, 等. 乌鲁瓦提水利枢纽工程混凝土面板砂砾石堆石坝坝体填筑施工技术[J]. 水利水电技术, 2003, 34(12): 12-13. (YANG Chang-zheng, WANG Jun, HONG Ying-dong, et al. CFRD filling construction technology of Wuluwati Hydropower [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(12): 12-13. (in Chinese))
- [9] 水利部大坝安全管理中心. 新疆乌鲁瓦提水利枢纽工程大坝安全综合评价报告[R]. 南京: 水利部大坝安全管理中心, 2003. (Dam safety Management Center, Ministry of Water Resources. Comprehensive evaluation report on dam safety of Wuluwati Hydropower [R]. Nanjing: Dam safety Management Center, Ministry of Water Resources, 2003. (in Chinese))
- [10] 南京水利科学研究院. 新疆乌鲁瓦提水利枢纽工程 2008 年监测资料整编分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (Nanjing Hydraulic Research Institute. Monitoring data reorganization analysis of Wuluwati Hydropower in 2008 [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [11] SL49-94, 混凝土面板堆石坝施工规范[S]. (SL49-94, Construction specification for concrete faced rockfill dams[S]. (in Chinese))
- [12] 高莲士, 宋文晶, 汪召华. 高面板堆石坝变形控制的若干问题[J]. 水利学报, 2002(2): 3-8. (GAO Lian-shi, SONG Wen-jing, WANG Zhao-hua. Deformation control issues of high concrete face rockfill dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(2): 3-8. (in Chinese))
- [13] 新疆水利水电科学研究院. 乌鲁瓦提大坝安全监测阶段分析报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆水利水电科学研究院, 2008. (Xinjiang Uygur Autonomous Region Research Institute of Water Conservancy and Hydropower. Dam safety monitoring phase analysis of Wuluwati Hydropower [R]. Urumchi: Xinjiang Uygur Autonomous Region Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, 2008. (in Chinese))

Safety monitoring analysis of Wuluwati concrete face gravel rockfill dam

HAN Yan-hong¹, LONG Zhi-fei²

(1. The Construction and Management Bureau of Wuluwati Hydropower, Hetian 848000, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Wuluwati dam is the first highest dam of CFRD in China, equipped with comprehensive monitoring instruments. Observation has been carried out for many years since the completion of the dam. A comprehensive analysis of dam monitoring data has been completed. Monitoring instruments for dam seepage, settlement deformation and concrete-face stress and strain are introduced. Evaluation results show that the dam is safe. Now the settlement is basically stable, the seepage condition of the dam has a good tendency, and the structural state is normal. This paper provides a reference way for other projects about the embedment of monitoring instruments and the analysis of monitoring data.

Key words: Wuluwati; Concrete face rockfill dam; instruments embedment; monitoring analysis; safety