

全坝外掺氧化镁混凝土自生体积变形性态分析

黄广开¹, 徐江²

(1. 奎屯农七师设计院有限公司, 新疆 奎屯 833200;

2. 中国水电顾问集团 贵阳水利水电勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 针对常态碾压混凝土拱坝受温控措施制约而产生不均匀的收缩变形和坝面裂缝问题, 基于 MgO 混凝土材料延迟膨胀特点, 通过沙老河与三江拱坝 8~10 年的自生体积变形监测资料, 对全坝外掺 MgO 混凝土的自生体积变形性态特征进行了较为深入地对比分析和比较, 结果表明, 外掺 MgO 混凝土可有效减少混凝土拱坝常见的温度变形问题, 并降低工程成本, 为其它类似工程设计提供有益的参考。

关键词: 外掺 MgO 混凝土; 自生体积变形; 监测; 性态分析

中图分类号: TV642

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2012)02-0070-06

Behavior Analysis on Autogenous Volume Deformation of Arch Dam with MgO Concrete

HUANG Guang-kai¹, XU Jiang²

(1. Kuitun Nongqishi Design Institute Co., Ltd., Kuitun, Xinjiang 833200, China; 2. Guiyang Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, China Hydropower Consultant Group, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: According to the normal roller compacted concrete arch dam easy of shrinkage distortion and dam-face crack under the condition of imperfect techniques of temperature control, based on the delay inflation feature of MgO concrete, and with the monitoring data of autogenous volume deformation from Shalaohe and Sanjiang arch dam for 8 to 10 years, the characteristics of autogenous volume deformation of MgO concrete are compared and analyzed deeply. It can be concluded that the addition of MgO in concrete could effectively tackle the common issues of temperature deformation, higher cost and so on in concrete arch dams, providing useful references for other projects and designers.

Keywords: MgO concrete; autogenous volume deformation; monitoring; behavior analysis

1 概述

全坝外掺 MgO 混凝土^[1]筑坝技术是指在生产大坝混凝土时加入适量的、特制的 MgO, 利用其特有的延迟微膨胀^[2]性能补偿混凝土坝的温度收缩变形, 降低坝体混凝土的拉应力。采用 MgO 混凝土, 辅以其它的适当措施, 可以全部或部分取代传统的混凝土坝温控措施, 不仅有利于减少混凝土坝的开裂问题, 而且可以实现长块、厚层、通仓连续(或短期间歇)浇筑^[3], 降低工程造价, 简化施工工艺, 大大加快施工进度。

我国在 20 世纪 90 年代初在东风电站拱坝基础和普定水电站大坝工程中使用 MgO 混凝土技术。2001 年至今, 我国相继修建了全坝外掺 MgO 混凝土

的沙老河、三江、落脚河、马槽河、老江底混凝土拱坝和鱼筒河、黄花寨碾压混凝土拱坝。MgO 混凝土在这些水库大坝应用中均取得了明显的技术经济效益。从沙老河拱坝^[3]开始, 在拱坝坝体均针对性地埋设了与 MgO 混凝土性能有关的观测仪器。大部分工程的观测工作延续至今, 积累了大量资料。将部分工程的原型观测资料^[4-5]进行整理分析和评价, 对全坝外掺 MgO 混凝土拱坝的设计和该项技术的发展无疑是有益的。

2 沙老河、三江拱坝混凝土自生体积变形监测

2.1 沙老河拱坝

沙老河拱坝^[6]是我国采用全坝外掺 MgO 混凝土

土不分横缝快速筑拱坝技术建成的第一座 MgO 混凝土拱坝。水库总库容 $1\ 577 \times 10^4\ \text{m}^3$,最大坝高 63.7 m,从坝基到坝顶粉煤灰掺量为 30% ~ 40%,MgO 掺量为胶凝材料的 3.5% ~ 5.5%,大坝采用通仓不分横缝快速施工,于 2001 年 3 月 15 日至 2001 年 9 月 30 日建成,共浇筑混凝土 $5 \times 10^4\ \text{m}^3$,工期 195 天。大坝设置有变形(含挠度)、坝基渗压、应力应

变、温度、混凝土自生体积变形及坝肩接触缝等观测项目。用于观测混凝土自生体积变形的无应力计共 17 套,目前完好仪器 14 套。分别在 1 177.50 m、1 189.50 m、1 202.00 m、1 212.00 m、1 222.00 m 高程拱圈中心线上的左、中、右坝段,以及高程 1 227.00 m 左、右坝段,各布置一套无应力计。监测仪器布置详见图 1,坝体不同高程 MgO 掺量见图 2。

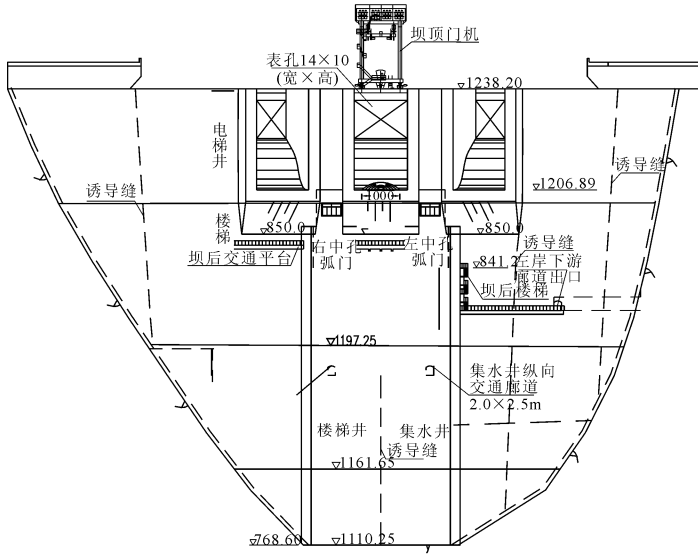


图 1 沙老河拱坝监测仪器布置图

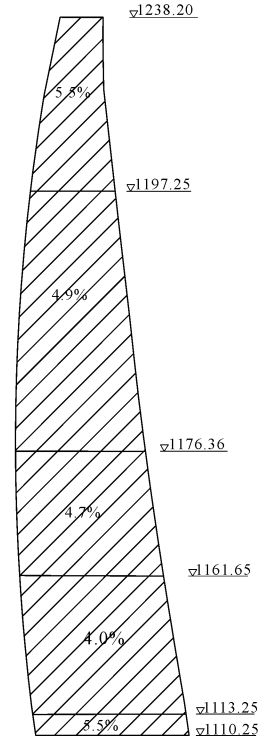


图 2 MgO 掺量示意图

无应力计埋设于 2001 年 3 ~ 9 月完成并开始观测,至今已 10 年有余,实测不同龄期不同高程混凝土

的平均温升及同期的自生体积变形量见表 1,各测点实测混凝土膨胀量变化过程如图 3 所示。

表 1 沙老河拱坝不同龄期各高程混凝土的平均温升及膨胀增量

高程 /m	埋设日期 年-月	入仓温度 /℃	0 ~ 7 d		8 d ~ 30 d		31 d ~ 90 d		91 d ~ 180 d		181 d ~ 360 d		361 d ~ 720 d		721 d ~ 1080 d	
			平均温升 /℃	膨胀增量 / μE	平均温升 /℃	膨胀增量 / μE	平均温升 /℃	膨胀增量 / μE	平均温升 /℃	膨胀增量 / μE	平均温升 /℃	膨胀增量 / μE	平均温升 /℃	膨胀增量 / μE	平均温升 /℃	膨胀增量 / μE
1177.5	2001-03	21.7	6.6	32.1	6.1	19.9	3.9	18.2	2.1	12.7	-0.3	7.9	4.0	3.6		
1189.5	2001-04	14.7	11.9	18.4	16.1	33.7	15.2	24.8	12.7	20.0	6.2	13.3	8.2	6.9		
1202.0	2001-06	26.9	7.5	23.7	7.6	30.6	6.8	20.2	2.1	15.7	-5.8	18.7	7.9	5.2		
1212.0	2001-07	28.6	7.5	21.1	8.2	31.8	4.4	21.8	-4.6	13.1	-12.3	18.3	4.2	4.0		
1222.0	2001-08	24.8	8.8	27.6	8.6	27.2	2.2	15.6	-6.7	12.2	-6.0	11.5	8.2	5.6		
1227.0	2001-09	22.1	9.7	12.3	9.1	18.1	1.6	18.1	-7.4	11.3	-4.9	7.9	5.7	4.4		

注:平均温升栏“+”表示温升,“-”表示温降。

续表 1 沙老河拱坝不同龄期各高程混凝土的平均温升及膨胀增量

高程 /m	1081 d ~ 1440 d	1441 d ~ 1800 d	1801 d ~ 2160 d	2161 d ~ 2520 d	2521 d ~ 2880 d	2881 d ~ 3240 d	3241 d ~ 3600 d	2011-09-22 累计膨胀量 / $\mu\epsilon$
	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	
1177.5	3.2	2.8	2.0	1.1	1.0	0.9	1.0	113.6
1189.5	5.9	3.6	2.3	1.3	1.4	1.0	2.0	148.7
1202.0	3.1	2.5	1.5	1.1	0.9	1.0	0.8	138.0
1212.0	2.8	2.5	2.4	2.1	1.2	1.2	1.1	130.4
1222.0	5.1	3.9	3.5	3.3	2.3	2.2	1.2	134.5
1227.0	4.2	5.4	3.0	2.9	2.3	2.4	1.7	100.9

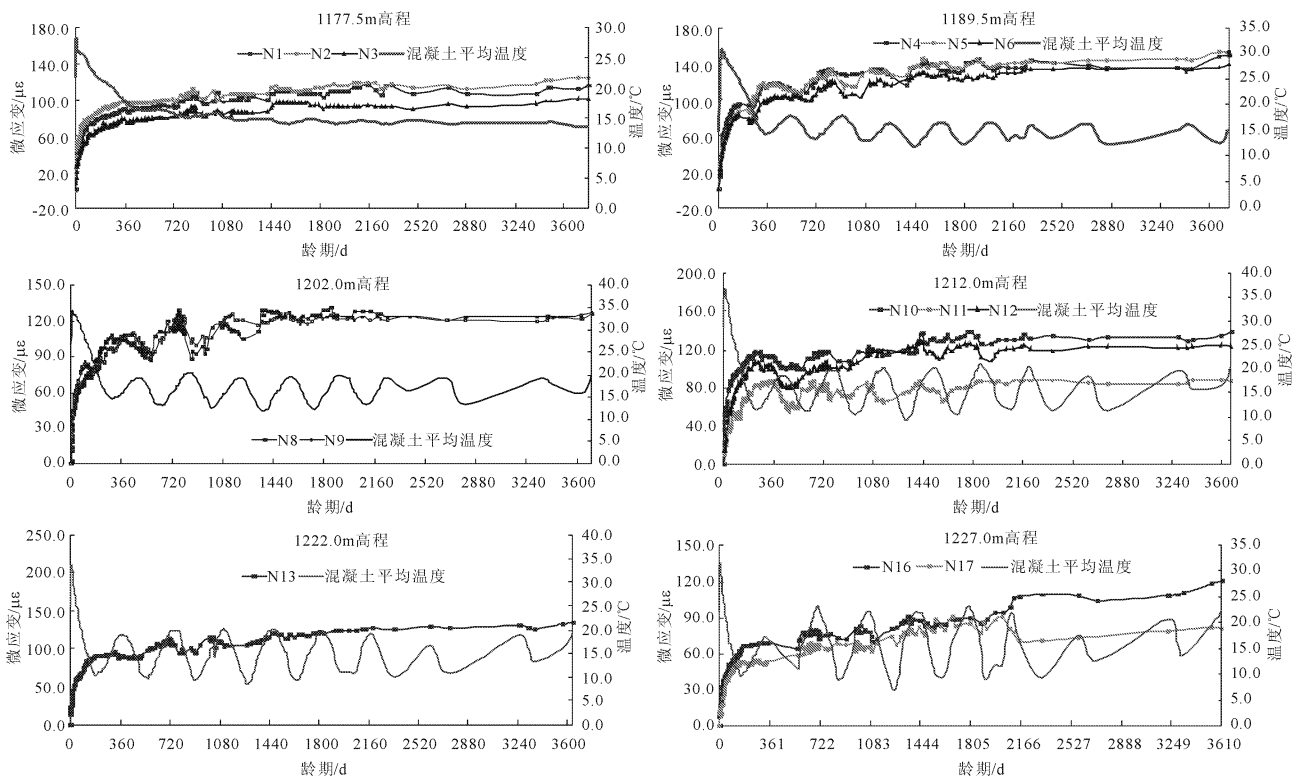


图 3 无应力计实测沙老河拱坝自生体积变形曲线图

由表 1 和图 2 可见,① 早期(0~90 d)混凝土膨胀量与温升值呈正相关关系,混凝土温升值高,膨胀增量。90 d 后混凝土温度逐渐降低,其膨胀增量明显减小;一年后温度已接近稳定温度场,坝体温度主要受气温影响呈年周期性变化。以往室内试验观测成果表明,在 400 d 以后混凝土基本不再膨胀,本例观测发现第 2 a~5 a 仍有 $3 \mu\epsilon \sim 6 \mu\epsilon$ 的膨胀增量,第 6 a~8 a 以后有 $1 \mu\epsilon \sim 2 \mu\epsilon$ 的膨胀增量,第 8 a 至今约有 $1 \mu\epsilon$ 的膨胀增量,基本呈现稳定趋势。② 设计计算采用 180 d 混凝土龄期具有 $120 \mu\epsilon$ 的期望值,2001 年 11 月初,拱坝混凝土浇筑 3~8 个月,实

测混凝土平均膨胀量只有 $78 \mu\epsilon$,混凝土膨胀量补偿不足,加之寒潮袭击,坝体温度骤降 $10^\circ\text{C} \sim 24^\circ\text{C}$,而坝体保温措施未完全跟上,导致坝体左右坝端产生四条贯穿性裂缝。③ 180 d、360 d 实测混凝土平均膨胀量分别为 $83 \mu\epsilon$ 、 $96 \mu\epsilon$,还是未达到预期膨胀量,约为预期膨胀量的 69%、80%。观测成果表明 MgO 混凝土约 80% 的膨胀量在 400 d 龄期内完成,后期特别是 720 d 以后膨胀增量逐渐减小并趋于稳定,目前实测混凝土总膨胀量平均为 $128 \mu\epsilon$,基本达到期望值。

2.2 三江拱坝

三江拱坝^[7]最大坝高 71.5 m,水库总库容 687 万 m³。2002 年 12 月~2003 年 5 月建成,施工期 186 d,共浇筑混凝土 4 万 m³。大坝左右坝端各设置一条诱导缝。全坝混凝土粉煤灰掺量为 30%,MgO 掺量 4.5%~5%。大坝设置有变形(含挠度)、渗流渗压、应力应变、温度、自生体积变形、诱导缝及坝肩接触缝观测项目。布置无应力计共 18 套,目前完好仪器 15 套。仪器布置与沙老河拱坝相同,分别布置在 1 100.00 m、1 115.00 m、1 130.00 m、1 145.00 m 高程拱圈中心线的左坝段、中部及右坝段和 1 167.50 m 高程左右坝段,见图 4 所示。

无应力计埋设于 2002 年 12 月~2003 年 5 月完成并开始观测,至今已 8 年有余,实测不同龄期不同

高程混凝土的平均温升、平均膨胀增量见表 2,各测点实测混凝土膨胀量变化过程如图 5 所示。

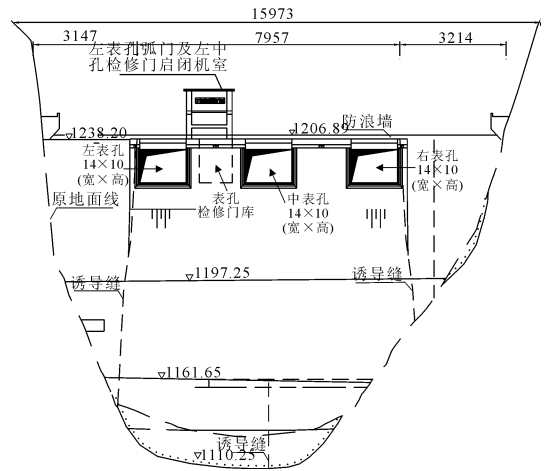


图 4 拱坝仪器布置下游立式图

表 2 三江拱坝不同龄期各高程混凝土的平均温升及膨胀增量

高程 /m	埋设日期 (年-月)	入仓温度 / (°C)	0~7 d		8 d~30 d		31 d~90 d		91 d~180 d		181 d~360 d		361 d~720 d	
			平均温升 /°C	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	平均温升 /°C	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	平均温升 /°C	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	平均温升 /°C	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	平均温升 /°C	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	平均温升 /°C	膨胀增量 / $\mu\epsilon$
1100.0	2002-12	14.5	13.0	28.3	13.4	3.2	11.0	11.0	6.4	6.5	4.9	4.2	3.2	
1115.0	2003-01	13.9	9.5	24.9	11.3	9.1	7.0	2.6	6.4	11.7	7.2	10.7	6.3	
1130.0	2003-03	23.0	7.0	8.4	7.4	14.7	3.9	33.5	-0.5	20.2	-3.5	10.5	6.6	
1145.0	2003-04	24.1	11.3	19.3	9.2	31.5	0.2	31.8	-2.3	21.0	-6.0	12.5	10.8	
1167.5	2003-05	24.2	11.1	27.8	7.5	28.9	2.6	11.6	-5.6	22.1	-2.0	19.1	11.5	

注:平均温升栏“+”表示温升,“-”表示降温。

续表 2 三江拱坝不同龄期各高程混凝土的平均温升及膨胀增量

高程 /m	721 d~1080 d	1081 d~1440 d	1441 d~1800 d	1801 d~2160 d	2161 d~2520 d	2521 d~2880 d	2881 d~3240 d	2011-09-22 累计膨胀量 / $\mu\epsilon$
	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	膨胀增量 / $\mu\epsilon$	
1100.0	2.5	2.2	2.3	1.0	1.1	0.9	0.8	89.4
1115.0	4.8	3.9	2.5	1.6	1.2	1.4	1.0	105.6
1130.0	5.4	4.3	3.0	2.8	2.0	1.0	0.7	117.4
1145.0	8.5	6.5	5.0	3.7	2.0	2.4	1.9	163.4
1167.5	8.8	6.5	3.6	1.5	1.6	1.4	1.5	152.4

由表 2 和图 3 可见,① 早期(0~90 d)混凝土膨胀量仍与温升值呈正相关,90 d 后混凝土膨胀增量随温度的降低而减小;180 d、360 d 实测混凝土平均膨胀量分别为 82 $\mu\epsilon$ 、93 $\mu\epsilon$,仍小于设计期望值(180 d 龄期 120 $\mu\epsilon$),分别占混凝土期望值的 68%、77.5%。② 虽然混凝土膨胀量补偿不足,但通过仿真计算后在两坝端正确设置诱导缝,以释放由于膨胀量不足引起的拉应力,通过测缝计观测在预计的

时间段诱导缝张开并达到仿真计算的开度,进行了接缝灌浆。至今,测缝计观测表明诱导缝处于完整闭合状态,见图 4。③ 本例观测成果表明 MgO 混凝土约 80% 的膨胀量在 400 d 龄期内完成,后期特别是 720 d 以后膨胀增量逐渐减小并趋于稳定,第 2 a~5 a 仍有 3 $\mu\epsilon$ ~7 $\mu\epsilon$ 的膨胀增量,第 6 a 以后基本稳定在 1 $\mu\epsilon$ ~2 $\mu\epsilon$ 的膨胀增量;目前实测混凝土总膨胀量平均为 126 $\mu\epsilon$,基本达到期望值^[8-10]。

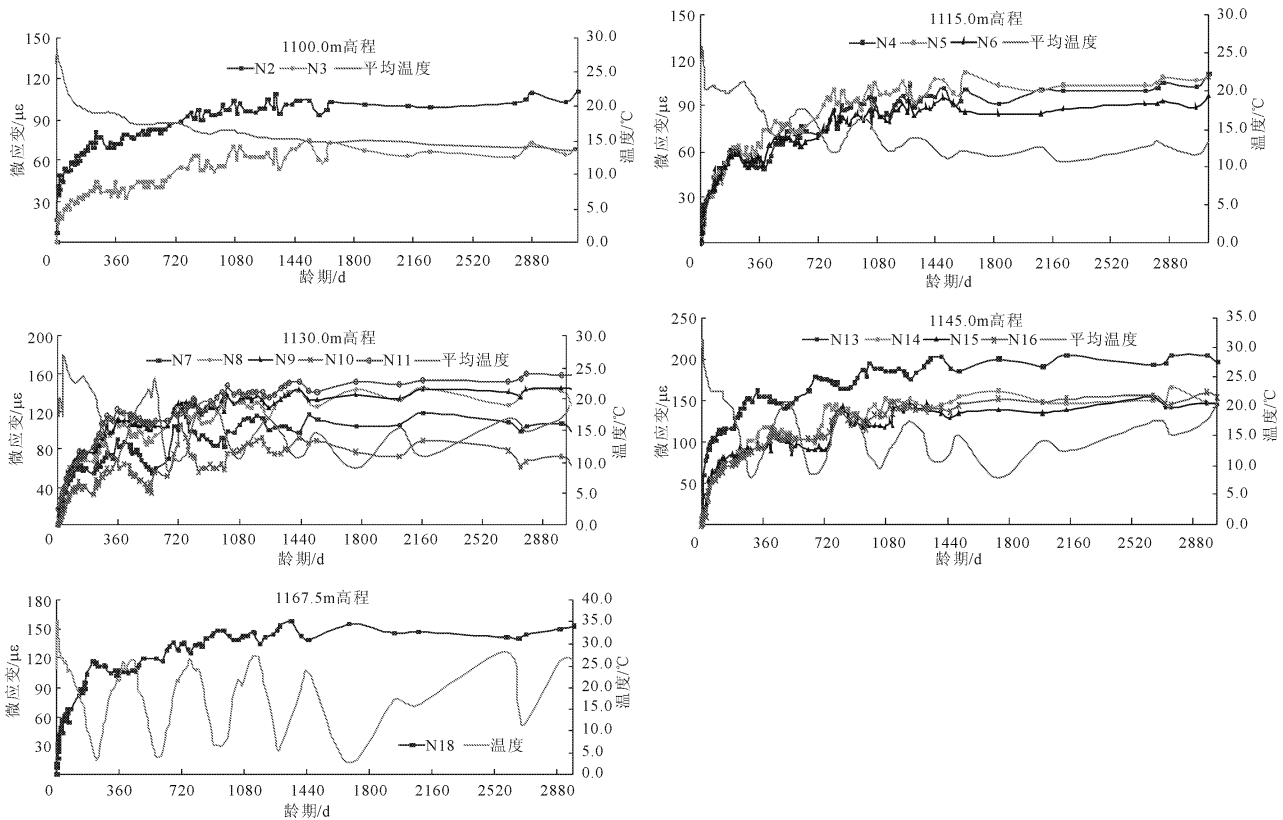


图 5 无应力计实测三江拱坝自生体积变形过程线图

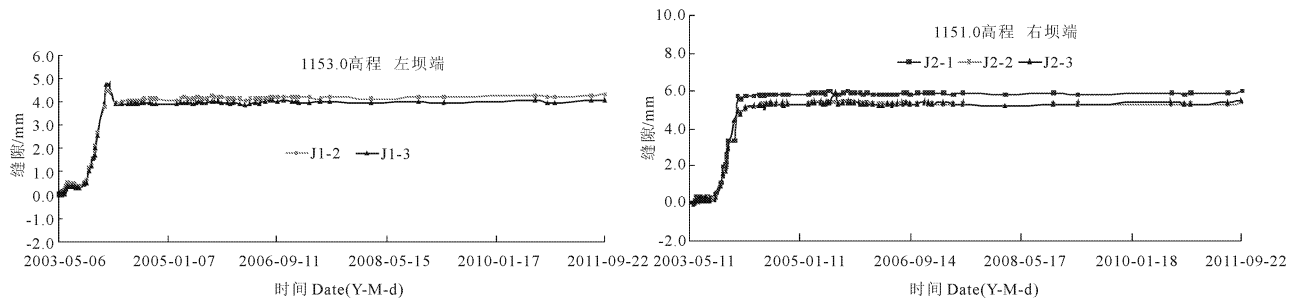


图 6 测缝计实测三江拱坝诱导缝变化过程线图

3 分析与评价

(1) 在混凝土胶材总量 200 kg/m^3 , MgO 掺量为胶材质量 $3.5\% \sim 5.5\%$ 时, 混凝土的微膨胀量约 $100 \mu\text{ε} \sim 170 \mu\text{ε}$, 平均 $125 \mu\text{ε}$ 。

(2) 两个拱坝工程, 坝体厚度均较薄, 一般经过一个冬季后, 坝体温度基本可达到稳定温度。温降时间约 $180 \text{ d} \sim 360 \text{ d}$, 而该时段内混凝土的微膨胀量平均值为 $80 \mu\text{ε} \sim 100 \mu\text{ε}$, 与设计预期的 $120 \mu\text{ε}$ 存在一定差距。这与工程所在地的环境温度有关, 设计拟定混凝土微膨胀量的期望值时, 要充分考虑此因素。

(3) 当环境温度相对较低, 或年温差相对较大

时如三江拱坝采取设诱导缝, 释放 MgO 混凝土补偿不足的温降拉应力是必要的。

(4) 拱坝运行以后的一段时间内, 混凝土的微膨胀量还有一定的发展, 从两工程的全面观测结果, 其膨胀对坝体没有产生不良反应。而沙老河拱坝由于某些原因, 建成 10 a 以来, 一直处于半库蓄水运行状态, 冬季坝体经受严寒, 尤其是 2008 年初贵阳市发生的“50 年一遇的持续凝冻灾害”天气, 坝体未做任何保温, 现场检查, 坝面混凝土完好, 是否系后期 MgO 混凝土的微膨胀作用, 仍有待进一步研究。

4 结 语

通过以上两拱坝混凝土自生体积变形的原型观

测资料分析表明:

(1) MgO 混凝土的微膨胀量在 360 d 内为最多,基本结束则需要 720 d ~ 1 400 d,其后的发展已很小,仅 $1 \mu\epsilon$ 左右。

(2) 设计 MgO 混凝土微膨胀量的采用,要充分考虑坝体温降过程与该期间混凝土微膨胀量的变化关系,以合理选择期望值。

(3) 对于中小型混凝土拱坝,当坝体温降过程较短,不能充分利用 MgO 混凝土的微膨胀量而局部坝体温降拉应力又较大时,辅以设诱导缝等措施是必要和可行的。

(4) 坝体运行后龄期 MgO 混凝土微膨胀量仍有一定的发展,为更清楚地掌握其变化规律,分析其利弊,不仅在仿真计算时要充分考虑,而且要坚持长期观测。

参考文献:

[1] 陈其武,李晓新,等.氧化镁混凝土筑坝技术文集[C]//北京:电力工业部、水利部水利水电规划设计总院,

1994.

- [2] 朱伯芳.论微膨胀混凝土筑坝技术[J].水利发电,2000,(3):1-13.
- [3] 曹泽生.MgO 微膨胀混凝土快速筑坝防裂技术研究[J].水力发电,1994,(6):52-53.
- [4] 罗恒,庞先明,陈浩,等.MgO 微膨胀混凝土拱坝安全监测[J].贵州水力发电,2007,21(3):71-75.
- [5] 罗恒,张国新,庞先明,等.全掺 MgO 整体拱坝的工作性状分析[J].水力发电,2007,33(12):31-34.
- [6] 庞先明,涂富银,晏卫国,等.沙老河拱坝 MgO 混凝土工作形态分析[J].贵州水力发电,2007,21(4):48-51.
- [7] 朱伯芳,张国新,杨波,等.三江拱坝温度应力仿真计算及温控措施研究报告[R].贵阳,中国水电顾问集团贵阳水利水电勘测设计研究院,2003.
- [8] 陈昌礼,郑治,王小健.氧化镁混凝土的力学及变形性能试验研究[J].水电站设计,1993,(3):66-70.
- [9] 李承木,杨元慧.氧化镁混凝土自生体积变形的长期观测结果[J].水利学报,1999,(3):54-58.
- [10] 张国新,陈显明,杜丽惠.掺氧化镁混凝土的膨胀效果分析[J].水利学报,2005,36(2):185-189.