

氧化镁混凝土拱坝的宏观变形

赵其兴^{1,2}

(1. 贵州中水建设管理股份有限公司, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:在整理三江拱坝等氧化镁混凝土拱坝工程长达十年之原型监测资料的基础上,结合拱坝在库水、空气、地基等边界条件下的实测温度,讨论拱坝的温度场及温度作用。同时,三江拱坝的正倒垂观测资料表明,全坝混凝土外掺氧化镁后使拱坝产生了类似于温升作用的变形效果,在宏观变形上进一步验证氧化镁混凝土的膨胀效应,并从拱坝宏观变形的角度讨论了混凝土外掺氧化镁后的工程意义。

关键词:氧化镁混凝土;拱坝;正倒垂观测;宏观变形;微膨胀

中图分类号:TV642.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)06-0073-05

Macroscopic deformation of MgO concrete arch dams//ZHAO Qixing^{1,2} (1. Guizhou Zhongshui Construction Project Management Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on 10 years of prototype monitoring data of existing MgO concrete arch dams in China, such as the Sanjiang Arch Dam, and in combination with measured temperatures under the boundary conditions in regard to reservoir water, air, and foundation, the temperature field and temperature load of arch dams are discussed. Observed data from the Sanjiang Arch Dam using the plumb line and inverted plumb line method indicate that the deformation of the arch dam induced by adding MgO to concrete for dam construction is similar to that caused by temperature rise, verifying the expansion effect of MgO concrete. From the viewpoint of the macroscopic deformation of the arch dam, the engineering significance of MgO concrete is further discussed.

Key words: MgO concrete; arch dam; monitoring with plumb line method and inverted plumb line method; macroscopic deformation; micro-expansion

贵州省境内第一座全坝外掺氧化镁(MgO)混凝土拱坝是建于2001年的沙老河拱坝,该坝在两坝端产生了多条竖直、径向分布的贯穿性裂缝^[1]。三江拱坝在总结沙老河拱坝经验的基础上于2003年建成并获得成功,成为贵州省运用全坝外掺MgO混凝土拱坝技术的范例^[2-5],其在两坝端设置诱导缝的经验先后在落脚河、马槽河、老江底、鱼简河、黄花寨等拱坝工程得到推广应用^[6-7]。

笔者结合三江拱坝长达十年的原型监测资料^[8],以分析正倒垂观测资料为主线,从拱坝宏观变形角度讨论混凝土外掺MgO后的工程意义。

1 大坝温控设计

三江水库是贵阳市北郊水厂的主要水源,总库容687万m³,为年调节小(一)型水库。大坝为全坝外掺MgO混凝土双曲拱坝,坝高71.5m,坝顶弧长137.538m,顶宽4m,底厚10.482m。

设计时采用中国水利水电科学研究院的Saptis程序^[9]进行了多种温控措施方案下的仿真计算,对

比分析了无膨胀补偿、单纯膨胀补偿、补偿加少量缝等温控方案。仿真计算表明三江拱坝由于坝体薄、散热快,完工后第一个冬季即可回落至环境温度。

在无MgO混凝土膨胀补偿作用时,拱坝基础约束区出现大范围拉应力,两坝端拉应力超过3.75MPa,拱冠梁拉应力达到1.86MPa,大坝将开裂。在考虑MgO混凝土膨胀补偿作用后,坝高40m以下部位应力满足抗裂要求,补偿作用效果明显,但两坝肩有超过2.0MPa的拉应力,仍需辅以其他温控措施。在两坝肩1145m高程各设一条诱导缝后,除基础面局部应力集中部位外,坝体拉应力明显改善且大都在1.5MPa以内,见图1。在此基础上,最终选择了在两坝肩各设置一条诱导缝并全坝外掺MgO混凝土的温控措施方案。

MgO混凝土具有延迟性微膨胀的特性,主要利用该特性来补偿大坝混凝土浇筑后升温并回落到环境温度所带来的收缩问题,依靠自然散热而不进行人工通水冷却,必要时设置少量的诱导缝或横缝,这是三江拱坝工程温控措施设计的基本理念。

作者简介:赵其兴(1972—),男,贵州织金人,高级工程师,博士,主要从事水工结构设计。E-mail:706724813@qq.com

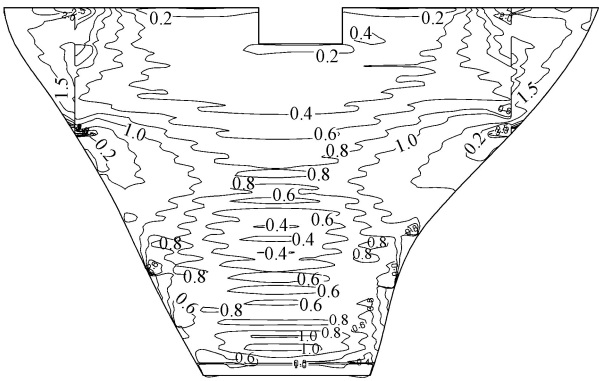


图1 中剖面各点第一主应力最大值等值线 (单位:MPa)
(诱导缝+MgO 4.5%)

2 大坝原型监测

三江拱坝原型监测项目有坝体变形(含挠度)、混凝土自生体积变形、坝体温度、诱导缝开合度及坝基渗压等,共在坝体内部埋设了各类仪器 142 支(套),其中应变计 50 支、无应力计 28 套、温度计 39 支、裂缝计 14 套、测缝计 6 支、渗压计 5 支。

正倒垂观测以拱冠梁为基本监测断面,分别在约 1/3 坝高、2/3 坝高和坝顶设置了变形监测点,能够了解坝体 1 125.60 m、1 148.00 m、1 169.50 m 等 3 个高程的绝对位移状态,表 1 摘录了部分冬季和夏季时的监测数据。

表 1 大坝拱冠梁正倒垂位移监测成果

观测日期	位移/mm						水库 水位/m
	高程 1125.58 m		高程 1148.00 m		高程 1169.50 m		
	上下游	左右岸	上下游	左右岸	上下游	左右岸	
2003-11-12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2004-02-16	0.96	-1.71	-0.33	2.31	-1.91	-0.66	
2004-07-08	-2.86	-2.20	-6.30	0.29	-4.92	-2.64	
2005-02-24	-0.68	-1.14	-3.05	1.91	-3.99	-0.93	
2005-06-17	-1.53	-0.77	-8.45	1.36	-6.31	-1.64	1134.5
2006-03-18	5.13	-1.10	-2.51	1.74	-1.27	-1.25	1158.4
2006-08-16	3.46	-0.88	-21.13	0.81	-13.66	-2.60	1163.0
2007-03-14	6.79	0.25	-5.60	2.71	-2.68	-0.57	1159.6
2008-02-19	8.54	1.10	0.20	-0.12	6.97	3.29	1156.0
2009-03-28	5.86	-0.82	-9.05	2.55	-5.32	-1.45	1155.0
2010-08-25	1.71	-1.00	-20.41	1.41	-15.74	-2.48	1155.0

注:以下游、左岸位移为正,反之为负;基准日期为 2003 年 11 月 12 日。

表 2 大坝温度监测成果

高程/m	1/3 拱圈(左)		拱冠(中)		1/3 拱圈(右)	
	夏季/℃	冬季/℃	夏季/℃	冬季/℃	夏季/℃	冬季/℃
1 163	25.0~25.8	12.7~14.2			25.0~25.2	13.4~14.8
1 159			23.3~23.8	12.7~14.7		
1 145	15.1~18.0	10.1~10.3	15.0~20.0	10.1~11.5	14.9~19.9	10.0~11.6
1 132	13.5~19.5	10.2~11.6	12.9~18.6	9.8~10.9	12.9~18.4	10.1~11.0
1 115	13.4~14.3	11.8~11.9	12.5~17.0	10.1~10.5	13.0~15.7	11.3~11.8
1 100			14.4~14.5	13.4~13.7		

注:①表中数据包含了各监测断面上、中、下 3 个点坝体混凝土温度;②夏季和冬季分别以 2006 年 8 月和 2009 年 3 月为代表。

坝体温度场监测断面包含拱冠梁及两侧 1/3 拱圈共 3 个断面,能够了解到 1 100 m、1 115 m、1 132 m、1 145 m、1 159 m、1 163 m 等高程坝体温度,表 2 为冬季和夏季代表性日期坝体温度的监测成果。

3 关于三江拱坝变形的讨论

拱坝是一种大体积的空间壳体结构,多拱梁试载法将之简化为水平拱圈和竖直梁体系,通过拱和梁变位协调来求解结构内力,以下讨论基于该算法。

水库水位和环境温度周期性变化会导致水压力及坝体温度周期性变化,这是使拱坝产生周期性变形的原因。而坝体自重、泥沙压力、地基变形、混凝土徐变及混凝土自生体积变形等则会导致拱坝非周期性的变形,除此以外,地震等其他原因也会引起大坝变形。

3.1 水压力作用下的拱坝变形

三江拱坝下游水位较低,可忽略其影响,上游库水压力是引起拱坝变形的主要因素。上游水压力在立面上呈三角形分布,平面上则为均匀分布,在其作用下,拱圈和梁都向下游产生变形(图 2)。

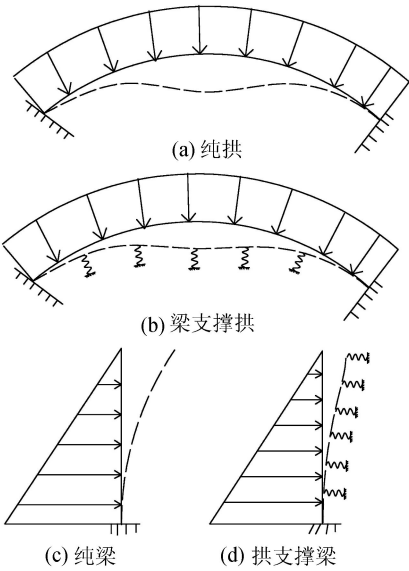


图 2 水压力作用下的拱梁变形

如图 2(a)所示,纯拱在均布水压力作用下,拱圈变位有以下特征:①绝对位移指向下游。②均布

荷载越大,拱圈的变形也越大;均布荷载相同时,拱跨度越大则其变形的绝对位移也越大。即库水位越高,拱变形也越大。

如图 2(c) 所示,在三角形分布水压力作用下,梁变位有以下特征:①绝对位移指向下游。②梁顶部位移最大、底部为零;库水位越高水压力越大,其导致的梁变形也越大。

如图 4(b) 和图 2(d) 所示,考虑拱梁变位协调后,可近似地将拱和梁视为相互支撑,即视为带有无数弹簧支座的拱或梁,变形量减小,但位移始终指向下游,其幅值随着库水位的升高而加大,随库水位回落而减少。

3.2 温度作用下的拱坝变形

拱坝上游面与库水接触,顶部及下游面与空气接触,运行期坝体温度主要与环境温度相关,而施工期尚与混凝土自身发热性能及施工温度控制措施等相关。这里并不讨论如何求解坝体温度本身,而是直接利用原型监测成果来讨论温度作用对拱坝变形的影响。

温度变化可分为两类:一是对应坝体温度总体上升或下降,拱坝规范中记为 T_m ;二是同一断面上、中、下游部位温度差异的影响,即线性或非线性温差,记为 T_d 。

T_m 能够引起拱圈的变形,但对顶部自由的悬臂梁而言则不会引起向上下游方向的变形。如图 3 所示,温升作用使得坝体混凝土热胀,因两拱端受基础约束而产生类似于“顶托”的作用,拱圈有向上游变形使拱圈曲率半径减小的趋势;而温降情况下混凝土冷缩,同样因受两拱端约束而产生与温升相反的“拉直”效应。换句话说,温升使得拱坝向上游变形、温降使拱坝向下游位移。

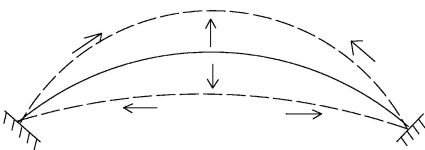


图 3 温度变化的拱圈变形效应

T_d 引起的变形具有局部性质,且与其具体分布情况相关。由表 2 可知,三江拱坝在冬季时上下游表面温度和内部混凝土温度基本一致,各部位 T_d 均较小,基本可忽略不计;夏季时,库水位以上 T_d 较小也可忽略,但库水位以下坝体温度表现出上游面相对凉、下游面相对热的规律,最大温差部位达到 6°C ,这与坝体上游与温度较低的库水接触、下游与温度相对高的大气接触是相符的。局部温差引起的变形效应是使结构局部弯曲,三江拱坝夏季时中下部坝体前凉后热的总体分布所导致的弯曲变形与拱

坝轮廓尺寸弯曲的方向相反,可近似理解为有将大体积壳体“扁平化”的趋势。受到拱坝周边基础的约束,这种因 T_d 而产生的扁平化作用会导致坝体产生向下游方向的相对位移,在一定程度上减小夏季温升时大坝向上游变形的幅度。

总的来说,可以归结为温升作用使拱坝向上游变形、温降使拱坝向下游变形。

3.3 三江拱坝变形规律

由表 1 所列数据可知,无论库水位和坝体温度如何变化,拱冠梁处坝体的变形在左右岸方向均较小,基本上都在 3 mm 以内,说明三江拱坝的对称形态较好。

拱冠梁处坝体变形以上下游方向为主,如图 4(a) 所示,至目前为止,坝顶 1169.50 m 高程向上游位移最大达 16 mm、向下游位移最大达 7 mm;向上游的最大位移出现在 1148.00 m 高程,达 21 mm,该高程未出现向下游的绝对位移值,最小向上游位移值为 0;而在 1125.60 m 高程,向上游的最大位移为 3 mm、向下游的最大位移为 8.6 mm。图 4(b) 为坝体温度呈现周期性变化后,典型的夏季(2006 年 8 月)拱冠梁变形状态,图 4(c) 为典型冬季(2009 年 3 月)状态,图 4(d) 为典型夏、冬季的变形情况对比示意。

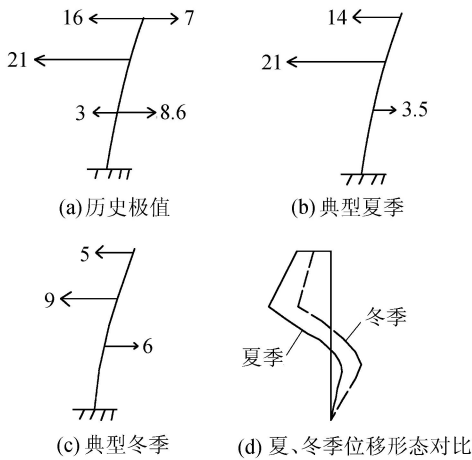


图 4 拱梁实测变形(正倒垂成果)(单位:mm)

3.4 关于正倒垂监测基准时机的讨论

由表 1 第一行数据可知三江拱坝正倒垂监测以 2003 年 11 月 12 日为基准点。查同期混凝土自生体积变形监测数据,此时混凝土膨胀量为 $34 \sim 89 \mu\epsilon$,已完成十年后总膨胀量($74 \sim 170 \mu\epsilon$)的 43% ~ 63%。换言之,混凝土剩余膨胀量($40 \sim 88 \mu\epsilon$)对拱坝变形的影响将在正倒垂监测数据中得到反映,而基准日期之前约占总量一半的膨胀所产生的变形量已错失监测良机。

根据混凝土温度监测数据,如图 5 所示,坝体温度在浇筑混凝土后因水泥等水化发热而迅速上升至

27 ~ 36℃, 随后经历了半年到一年的自然冷却, 至 2003 年 11 月时坝体温度已降至 15 ~ 23℃ 之间, 平均 19℃。大致在一年后, 坝体温度开始呈现随环境温度规律性变化的特征, 基本上以当地多年平均气温 15℃ 为横轴, 水位以上坝体温度变化范围约为 5 ~ 25℃, 底部坝体温度变化范围约为 10 ~ 20℃。据此, 相对于正倒垂监测基准日期而言, 后续监测到的温度变形是以温降为主; 夏季高温时除靠近顶部暴露在空气中的坝体有近 10℃ 的温升以外, 底部坝体相对于基准日期反而有约 3℃ 的温降, 中部逐渐过渡; 而冬季时全部为温降, 温降幅度约为 10 ~ 13℃。

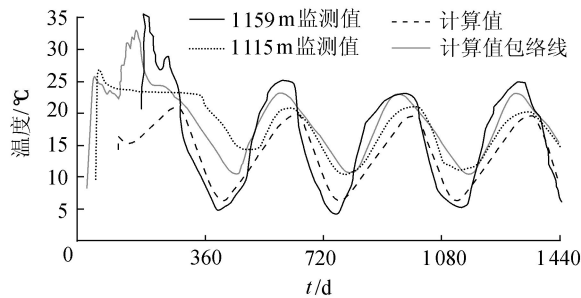


图5 坝体实测温度过程线及理论分析过程线

观察三江水库蓄水记录, 该项目于 2004 年 5 月完成蓄水安全鉴定后封堵导流洞, 冲沙底孔于同年 7 月 1 日下闸后开始蓄水。其后除 2005 年 5、6 两个月因故将水库水位降到 1135 m 附近以外, 后续 8 年半时期内, 水库均维持在较高水位运行, 多在 1155 ~ 1165 m 之间。相应地, 正倒垂监测基准日期水库水位较低, 也就是说, 水压力导致的拱坝变形在正倒垂监测数据中能得到反映。

由以上讨论可知, 在工程条件允许的情况下, 正倒垂监测时机应尽量靠前安排, 这样才能完整地捕捉到相关信息。

3.5 关于 MgO 混凝土膨胀变形的讨论

根据三江拱坝实测变形数据, 无论夏季(图 4(b))还是冬季(图 4(c)), 拱冠梁变形后的绝对位移均表现为靠近底部指向下游, 中上部指向上游。由上节讨论可知, 相对于基准日期, 正倒垂将监测到水库蓄水后产生的全部水压力、施工期向运行期过渡的混凝土降温以及接近一半的剩余膨胀量所带来的拱坝变形。水压力及温降作用都使拱坝拱冠产生向下游的变形, 而在两端基岩约束下混凝土膨胀作用将产生与温升相似的效果, 即使拱冠产生向上游的变形。分析拱冠梁中上部位移始终指向上游(尤其是冬季)的原因, 是混凝土膨胀产生的向上游变形量超过了水压力和温降带来的向下游变形量, 而到了坝体中下部, 随水头增加水压力作用逐渐占了上风, 才表现为向下游的绝对位移。而夏季和冬季拱冠

梁变形的差异, 则主要是夏冬季节温度变化所致。

在导致拱坝结构变形的其他因素中, 因三江拱坝拱冠梁及中部坝段断面均向下游侧倾斜, 仅靠近两岸端部坝体倒向上游侧, 故坝体自重产生的位移也应为指向下游, 不能解释三江拱坝指向上游的位移; 混凝土徐变是坝体应力松弛的原因, 也不能使坝体产生向上游的变形; 泥沙压力和水压力相似, 也是使大坝向下游变形; 此外, 没有迹象表明地基变形或地震等其他原因导致大坝产生了向上游的变形。

综上所述, 唯一能解释正倒垂监测数据反映三江拱坝变形指向上游的, 就是三江大坝混凝土外掺 MgO 后产生了后期微膨胀, 这种膨胀作用使拱坝产生了向上游变形的效应, 而如图 6 所示的大坝混凝土自生体积变形监测数据也支持了这种判断。此外, 图 6 还表明 MgO 混凝土自生体积变形已稳定, 不存在 MgO 混凝土安定性及无限制膨胀等问题。

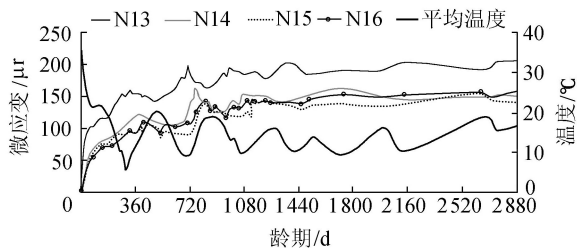


图6 坝体混凝土自生体积变形实测过程线
(1145.00 高程)

外掺 MgO 后的混凝土获得了延迟性的微膨胀性能, 产生了类似于温升的变形效应, 在一定程度上减小了温降产生的拉应力, 并使大坝向上游变形, 这种现象不仅在三江拱坝工程中被监测到, 同样也在其他工程中被监测到, 如图 7 所示沙老河拱坝拱冠(正倒垂)变形过程也与三江拱坝相类似。

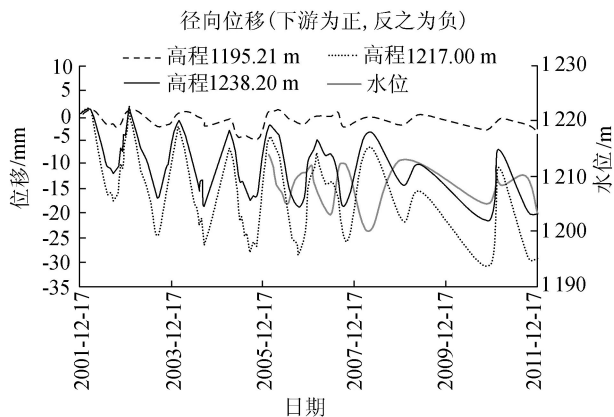


图7 沙老河拱坝拱冠(正倒垂)变形实测过程线

3.6 关于 MgO 混凝土室内外差别的讨论

李光伟等^[10]通过对比试验发现全级配混凝土的弹性模量、弯曲强度、徐变等均不同于湿筛试件, 因此建议大坝工程计算时应调整室内试验取得的参

数。由于监测仪器对混凝土骨料粒径的限制,施工中剔除大骨料是现在通行的做法,朱伯芳^[11]认为内部监测仪器测值与工程实际不一致,提出这一室内外差别不容忽视。

笔者原计划通过整理三江拱坝变形数据,通过反演计算的方法,找到将试验室中混凝土自生体积变形成果进行工程修正的方法。但由于三江拱坝工程实测的环境量不齐全,难以分离出气温、水压分量及时效分量,因此无法将时效分量与 MgO 分量进行对比分析并获得定量的数据,故本文最终只能开展定性分析工作。

除大坝混凝土室内外差别因素以外,实际工程设计中难以准确界定全部参数或边界条件,不能在真正意义上做到精确计算。因此,建立一些定性或宏观的判断、经验是有必要的,此时的计算与评价标准总体上是一种相对的评价体系。

4 结 语

通过对三江拱坝等工程长达十年的正倒垂观测,发现全坝混凝土外掺 MgO 后使拱坝产生了类似于温升效果的变形特性,在宏观变形上进一步验证了 MgO 混凝土的膨胀效应。此外,长期内部监测数据表明 MgO 混凝土自生体积变形已经稳定,大坝混凝土的长期安定性是可靠的。

参考文献:

[1] 赵其兴,申献平. 外掺 MgO 混凝土快速筑坝技术在沙老河拱坝的应用[J]. 广东水利水电,2003,115(3):6-8. (ZHAO Qixing, SHEN Xianping. Application of rapid construction technology with concrete mixed with MgO to Shalaohe Arch Dam[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2003,115(3):6-8. (in Chinese))

[2] 申献平,杨波,张国新,等. 沙老河拱坝整体应力仿真与掺 MgO 效果分析[J]. 水利水电技术,2004,35(2):38-40. (SHEN Xianping, YANG Bo, ZHANG Guoxing, et al. Simulating analysis of stress field and effect of MgO admixture in Shalaohe Arch Dam without monolith[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35 (2): 38-40. (in Chinese))

[3] 朱伯芳,张国新,杨卫中,等. 应用氧化镁混凝土筑坝的两种指导思想和两种实践结果[J]. 水利水电技术,2005,36(6):39-42. (ZHU Bofang, ZHANG Guoxing, YANG Weizhong, et al. Two kinds of guiding thought and two results of practical engineering for application of MgO concrete to dams[J]. Water Resources and Hydropower

Engineering,2005,36(6):39-42. (in Chinese))

[4] 张国新,杨卫中,罗恒,等. MgO 微膨胀混凝土的温降补偿在三江拱坝的研究和应用[J]. 水利水电技术,2006,37(8):20-23. (ZHANG Guoxing, YANG Weizhong, LUO Heng, et al. Application and study of MgO micro-expanding concrete for construction of Sanjiang Arch Dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2006,37(8):20-23. (in Chinese))

[5] 刘其文. 三江水库 MgO 混凝土拱坝设计[J]. 水利规划与设计,2008,84(4):85-87. (LIU Qiwen. Design of MgO concrete Sanjiang Arch Dam reservoir project[J]. Water Resources Planning and Design,2008,84(4):85-87. (in Chinese))

[6] 杨卫中,赵其兴. MgO 混凝土筑拱坝技术应用及研究[J]. 水利规划与设计,2008,84(4):4-9. (YANG Weizhong, ZHAO Qixing. Application of and study on MgO concrete in dam construction[J]. Water Resources Planning and Design,2008,84(4):4-9. (in Chinese))

[7] 郑国旗,赵其兴. 外掺氧化镁碾压混凝土技术在黄花寨水电站的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2012,10(3):208-213. (ZHENG Guoqi, ZHAO Qixing. The application of magnesia RCC technique in the Huanghuazhai hydropower station [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012,10(3):208-213. (in Chinese))

[8] 贵州省大坝安全监测中心. 贵阳市北郊水厂水源工程三江水库大坝内部观测资料分析报告[R]. 贵阳:贵州省大坝安全监测中心,2012.

[9] 张国新. Saptis:结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之一)[J]. 水利水电技术,2013,44(1):31-35. (ZHANG Guoxing. Development and application of saptis:a software of muti-field simulation and nonlinear analysis of complex structures (part I) [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2013,44(1):31-35. (in Chinese))

[10] 李光伟,杨代六. 拱坝大体积混凝土力学特性的试验研究[J]. 水电站设计,2006,22(2):88-92. (LI Guangwei, YANG Dailiu. Testing and study of arch dam mass concrete mechanical properties [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2006. 22 (2): 88-92. (in Chinese))

[11] 朱伯芳. 论混凝土坝的几个重要问题[J]. 中国工程科学,2006,8(7):21-29. (ZHU Bofang. On some important problems about concrete dams [J]. Engineering Science, 2006,8(7):21-29. (in Chinese))

(收稿日期:2015-07-15 编辑:方宇彤)