

基于实测资料的外掺 MgO 微膨胀混凝土变形性状研究

朱赵辉^{①②*}, 田振华^{①②}, 吕栳楦^②, 孙建会^{①②}

① 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

② 北京中水科水电科技开发有限公司, 北京 100038

* E-mail: zzhbb@163.com

收稿日期: 2014-06-05; 接受日期: 2014-07-08

北京中水科水电科技开发有限公司科研专项(批准号: JC-13-ZY-16)资助项目

摘要 外掺 MgO 混凝土产生的延迟性微膨胀能够补偿混凝土在温降过程中产生的收缩变形, 从而防止或减少混凝土产生裂缝. 本文通过对向家坝水电站导流底孔外掺氧化镁混凝土的室内试验和现场监测成果进行对比分析, 探讨了外掺 MgO 与未掺 MgO, 同类混凝土中掺量不同对混凝土变形特性的影响.

关键词
MgO
混凝土
微膨胀
自生体积变形

1 引言

普通混凝土由于温降收缩会产生拉应力, 外掺 MgO 混凝土能够使混凝土产生延迟性“微膨胀”变形, 产生预压应力, 能够部分补偿或抵消大体积混凝土的降温收缩和温度变形, 从而提高混凝土抗裂能力^[1-3].

鉴于这种优势, 有关科技人员从多方面开展了外掺 MgO 混凝土性能的研究工作. 袁明道等人^[4]以及李承木和杨元慧^[5]对 MgO 混凝土筑坝技术的实践形成及发展过程进行了总结, 并对多座大坝掺 MgO 混凝土自生体积变形进行了实际观测. 王述银等人^[6]对外掺 MgO 碾压混凝土自生体积变形进行了试验研究. 陈昌礼等人^[7,8]提出了 MgO 混凝土自生体积变形的反正切曲线模型, 并以此推算 MgO 混凝土的长期膨胀变形值.

上述研究多集中于 MgO 混凝土的室内试验和单一的原型观测, 对试验与实际工程的对比以及相同

混凝土配合比的 MgO 不同掺量之间的对比关注不足, 因此, 本文通过对向家坝导流底孔封堵段的未掺 MgO 混凝土与外掺不同含量 MgO 混凝土的原型观测结果之间的对比, 和与施工混凝土相同配合比的外掺不同含量 MgO 的室内试验之间的对比, 研究和分析了外掺 MgO 混凝土的自生体积变形特性.

2 工程概况

向家坝水电站在进行主体二期工程施工时由于渡汛需要, 在左岸主体工程预留了 6 个导流底孔, 1#, 3#和 5#导流底孔最后一段采用外掺 MgO 混凝土进行封堵, 其中 1#导流底孔 3 个仓, 仓位浇筑高程分别为 262~266 m, 266~272 m, 272~274 m; 3#导流底孔 2 个仓, 仓位浇筑高程分别为 268~272 m, 272~274 m; 5#导流底孔 2 个仓, 仓位浇筑高程分别为 268~272 m, 272~274 m. 每仓高度在 2~6 m^[9]. 1#和 3#导流底孔为

引用格式: 朱赵辉, 田振华, 吕栳楦, 等. 基于实测资料的外掺 MgO 微膨胀混凝土变形性状研究. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1027-1034
Zhu Z H, Tian Z H, Lv Z B, et al. Study on deformation characteristics of micro expansion concrete mixed with MgO based on the measured data (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 1027-1034, doi: 10.1360/N092014-00191

设计强度等级 C25 的混凝土, MgO 掺量均为 4%, 5# 导流底孔为设计强度等级 C20 的混凝土, MgO 掺量均为 5%。以上 MgO 掺量均为重量比。

为充分了解试验段外掺 MgO 混凝土的温度分布、混凝土特性, 在试验段分层布置温度计、测缝计和应变计组。在导流底孔各仓位中部分别沿上/下游方向布置 2 套五向应变计组, 并配套埋设相应的无应力计; 于上游侧封堵段老混凝土交界面埋设 2 支测缝计, 高程较低的部位左/右边墙各布设一支, 高程较高的部位在左/右拱肩各布设一支, 在顶拱部位布设一支; 为了解混凝土浇筑后温度分布概况, 在每一仓内同一水平面分别布置 3 支温度计, 1#导流底孔监测仪器布置如图 1 所示, 其他导流底孔与之类似。

在未外掺 MgO 的导流底孔第一段、第二段均布置有针对新老混凝土接缝开合度监测的测缝计, 可以与试验段缝开合度形成对比分析。

3 室内试验成果

3.1 不同掺量混凝土自身体积变形成果分析

向家坝水电站导流底孔封堵工程外掺 MgO 膨胀

剂混凝土施工配合比见表 1(掺量均为重量比)。不同混凝土室内自身体积变形试验曲线如图 2 和 3 所示^[10]。

根据监测成果可以看出:

1) 掺量 4%, 6% MgO 膨胀剂混凝土的自生体积变形均在 14 d 龄期前有一个突变过程, 14~240 d 为较为匀速的膨胀阶段, 240~270 d 龄期膨胀量开始收敛。

2) MgO 膨胀剂掺量低于 4% 的混凝土均体现为收缩变形, 掺量大于 4% 的混凝土自生体积变形呈现微弱膨胀性, 可将 4% 视为 MgO 膨胀剂在常态混凝土中的最低掺量。膨胀终止前, 外掺 4% MgO 混凝土的自生体积变形最大不超过 45 $\mu\epsilon$, 不影响混凝土的安定性, 外掺 6% MgO 混凝土的自生体积变形最大接近 60 $\mu\epsilon$, 基本不影响混凝土的安定性。

3.2 现场抽检混凝土室内检测成果分析

对左岸 1#导流底孔封堵第 5 段混凝土(4% MgO 掺量)和左岸 5#导流底孔封堵第 8 段混凝土(0% MgO 掺量, 5% MgO 掺量)进行了混凝土自生体积变形检测(掺量均为重量比)。检测结果见图 4^[10]。

由图 4 可以得出以下结论。1) 对于不掺 MgO 膨胀剂的混凝土, 在 14 d 龄期之前, 其体积收缩发展较

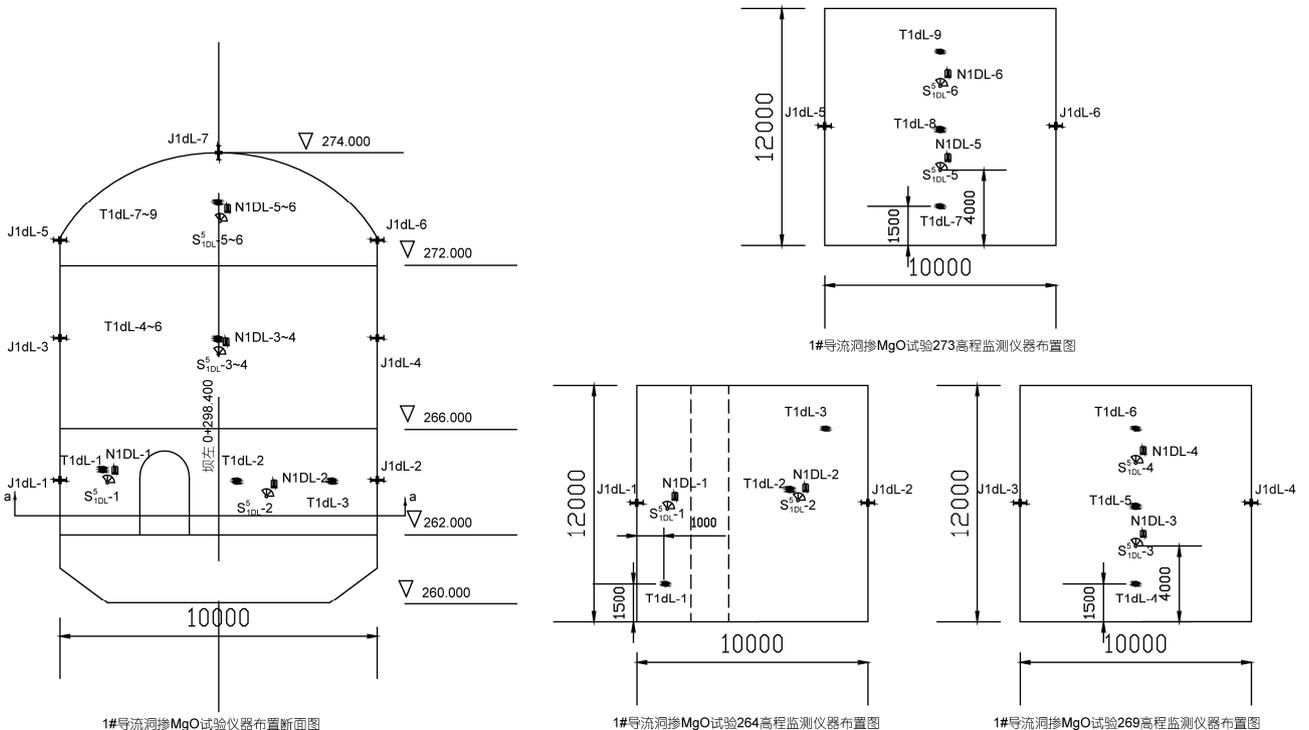


图 1 1#导流底孔外掺 MgO 试验段监测仪器布置图

表1 混凝土试验配合比

序号	混凝土设计指标	级配	水胶比	粉煤灰 (%)	用水量 (kg/m ³)	MgO (%)	砂率 (%)	外加剂		坍落度 (mm)	含气量 (%)
								减水剂 (%)	引气剂 (I/万)		
1	C25F150W10	二	0.42	25	110	0	32	JM-II C 0.6	ZB-1G 3.0	72	5.5
2					110	2	31	JM-II C 0.7	ZB-1G 3.0	70	5.5
3					110	4	31	JM-II C 0.8	ZB-1G 4.0	70	5.5
4					110	6	31	JM-II C 0.9	ZB-1G 4.0	68	5.3
5	C20F150W10	二	0.45	25	110	0	34	JM-II C 0.6	ZB-1G 2.0	70	5.2
6					110	2	33	JM-II C 0.7	ZB-1G 2.0	72	5.1
7					110	4	33	JM-II C 0.8	ZB-1G 3.0	72	5.3
8					110	6	33	JM-II C 0.9	ZB-1G 4.0	68	5.5

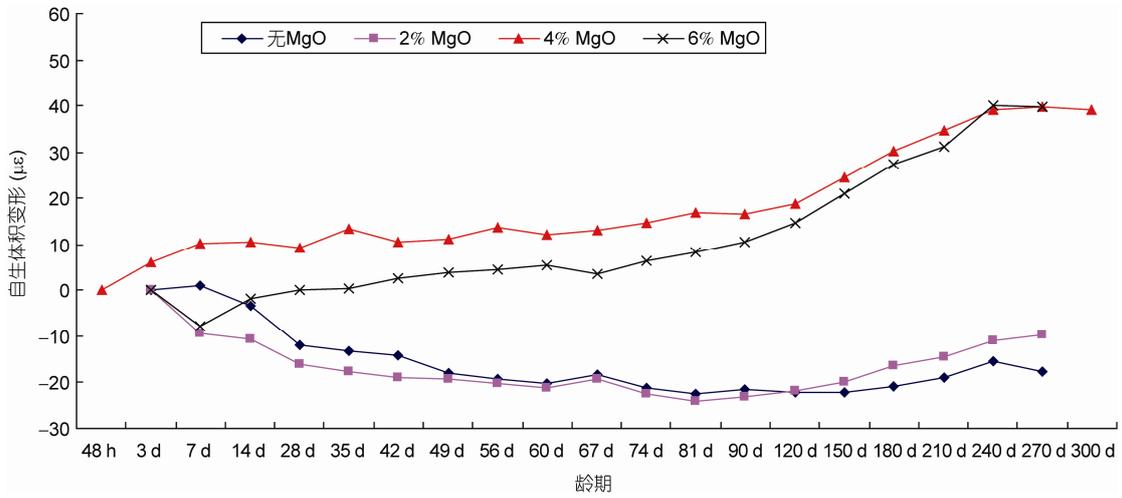


图2 (网络版彩图)C25F150W10 混凝土自生体积变形曲线

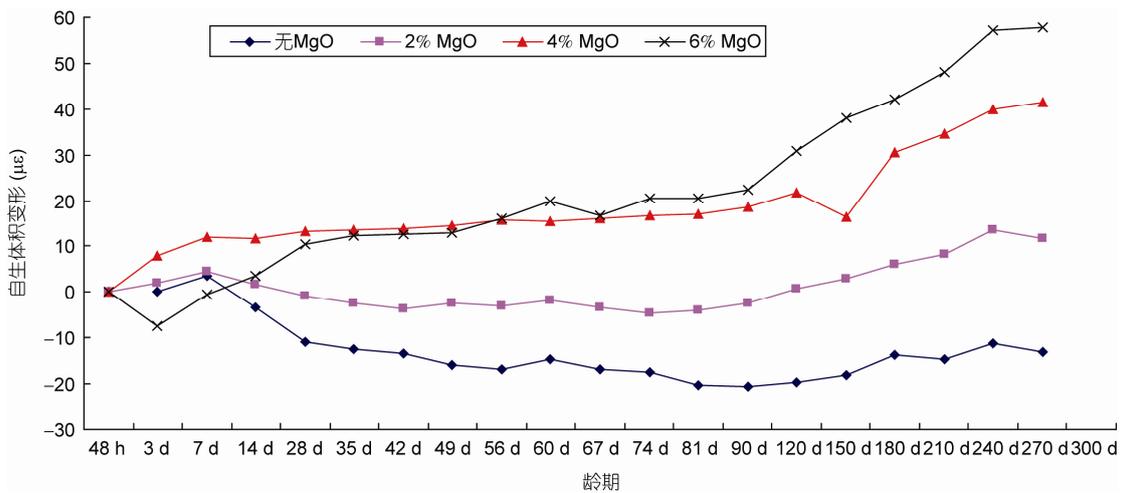


图3 (网络版彩图)C20F150W10 混凝土自生体积变形曲线

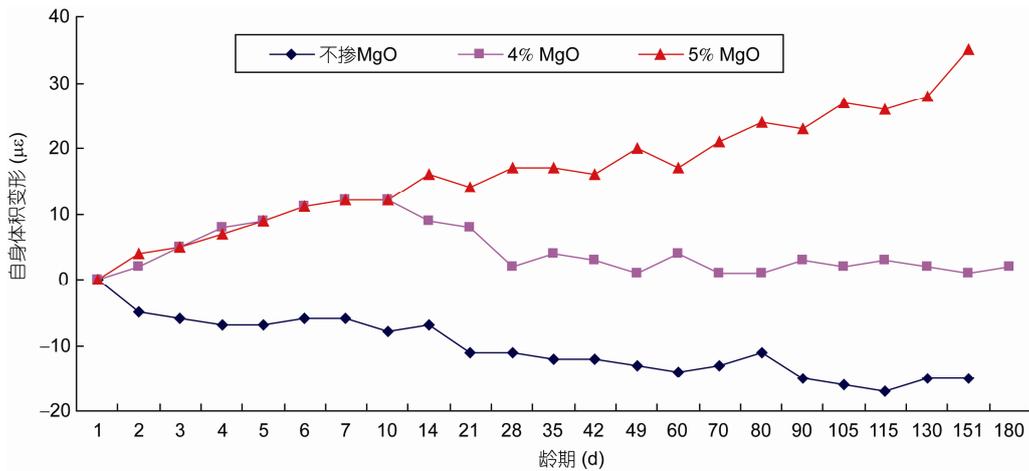


图 4 (网络版彩图)现场抽检混凝土自身体积变形曲线

快, 14 d 龄期之后, 体积变化趋于平缓; 2) 对于掺 MgO 膨胀剂的混凝土, 在 14 d 龄期之前, 其体积略有膨胀, 掺量为 4% 的混凝土 14 d 龄期之后, 开始缓慢收缩, 掺量为 5% 的混凝土 14 d 龄期之后膨胀量仍旧持续增加; 3) 不掺 MgO 膨胀剂的混凝土呈收缩状态, 外掺 MgO 膨胀剂的混凝土呈膨胀状态, 且掺量大的比掺量小的混凝土膨胀量大。整体来看, 其自身体积变化量均很小, 膨胀或收缩量均在 $\pm 40 \mu\epsilon$ 以内。

4 现场监测成果分析

4.1 无应力计

无应力计的监测资料主要受温度、湿度以及自身

体积变化的影响, 其影响因素组成明确, 从各无应力计测值变化过程曲线可见, 无应力应变对正常的温度变化有合理的反应, 监测成果见表 2, 测值过程线见图 5。1#和 3#导流底孔的混凝土龄期在 192~208 d, 从趋势上看, 在 20 d 龄期之内有持续膨胀变形的趋势, 之后趋于收敛, 目前呈现微弱收缩态势, 当前自生体积变形在 $-2.52 \sim 47.60 \mu\epsilon$; 5#导流底孔龄期在 150 d 左右, 在 20 d 龄期之内有较快的膨胀变形的趋势, 之后趋于平缓, 当前自生体积变形在 $33.43 \sim 56.17 \mu\epsilon$ 之间, 平均应变为 $42.55 \mu\epsilon$ 。

各导流底孔混凝土自生体积变形呈膨胀性, 主要发生在混凝土浇筑前期, 目前混凝土膨胀基本稳定, 其中 5#导流底孔混凝土膨胀量最大。

表 2 无应力计监测成果统计(2014/3/31)应变(单位: $\mu\epsilon$)

部位	仪器编号	埋设日期	龄期(d)	应变	最大值	最小值	平均值
1#	N1dl-1	20130905	208	2.22	47.6	2.22	34.31
	N1dl-2	20130905	208	38.91			
	N1dl-3	20130913	200	44.14			
	N1dl-4	20130913	200	36.63			
	N1dl-5	20130921	192	47.6			
	N1dl-6	20130921	192	36.38			
3#	N3dl-1	20130903	210	-2.52	18.69	-2.52	8.39
	N3dl-2	20130903	210	18.69			
	N3dl-3	20130919	194	17.36			
	N3dl-4	20130919	194	0.02			
5#	Ndl5-1	20131024	159	43.3	56.17	33.43	42.55
	Ndl5-2	20131024	159	33.43			
	Ndl5-3	20131103	149	37.28			
	Ndl5-4	20131103	149	56.17			

注: 负值表示收缩, 正值表示膨胀。

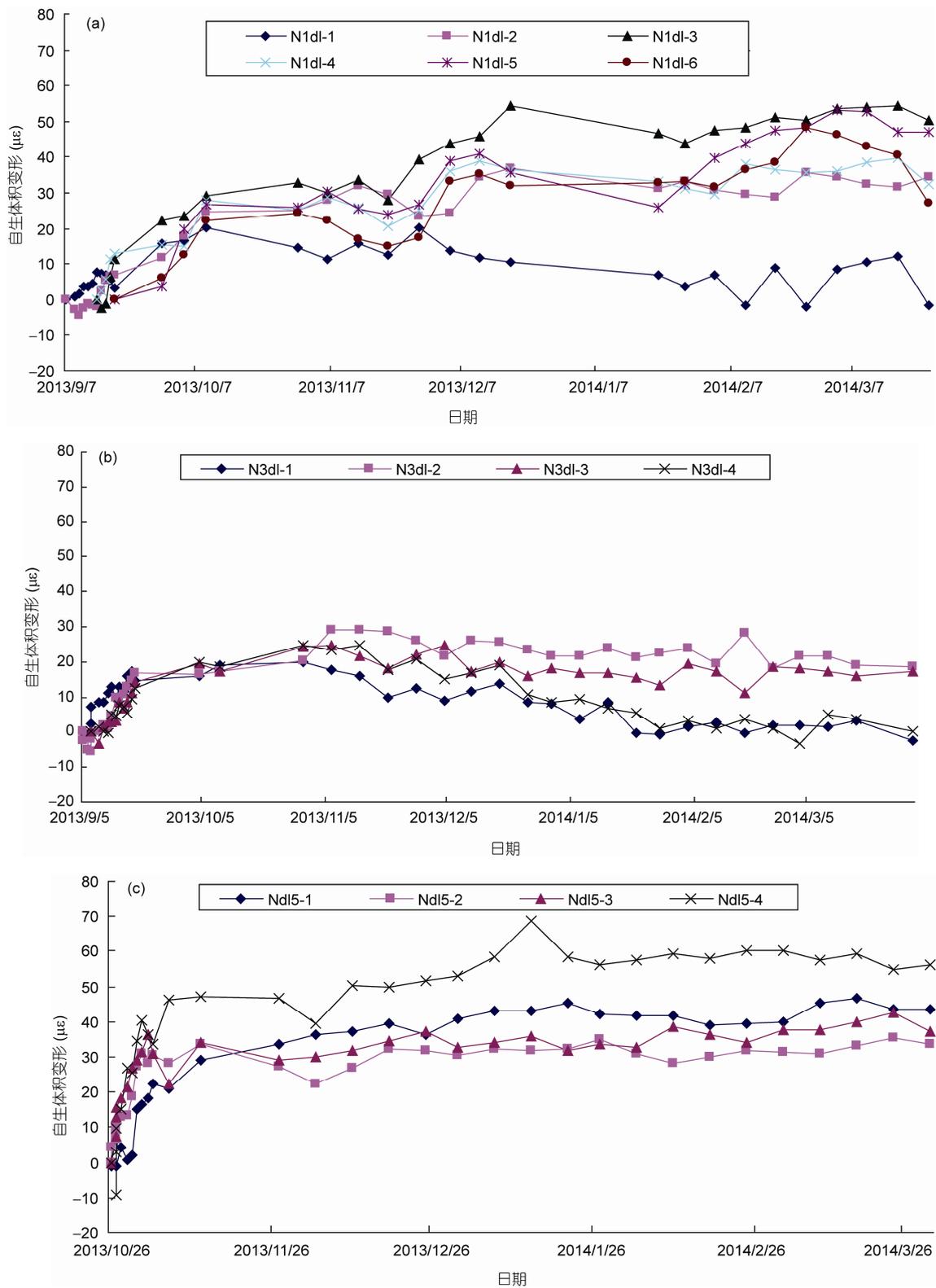


图 5 (网络版彩图)1#(a), 3#(b), 5#(c)导流底孔无应力计时间过程线

4.2 五向应变计组

坐标轴规定: 水流向为 X 轴, 坝轴线方向为 Y 轴, 铅直向为 Z 轴. 五向应变计组埋方式见图 6.

将五向应变计组测值按弹性力学初步计算得出轴向应变(未考虑徐变影响), 弹性模量根据参考文献[9]中的试验结果进行计算, 1#和 3#导流底孔的弹性模量取 31.8 GPa, 5#导流底孔的弹性模量取 29.1 GPa, 计算成果如表 3 所示, 从该表可以看出: 1) 1#导流底孔的底层应力最小, 第二层受力较大, 上层受力次之, 各测点各向应力均处于受压状态, 在三个部位中, 1#孔压应力最大; 2) 3#导流底孔下层混凝土压应力最大, 上层混凝土压应力次之, 各测点各向应力均处于受压状态; 3) 5#导流底孔除 S5d15-1 测点的上下游方向

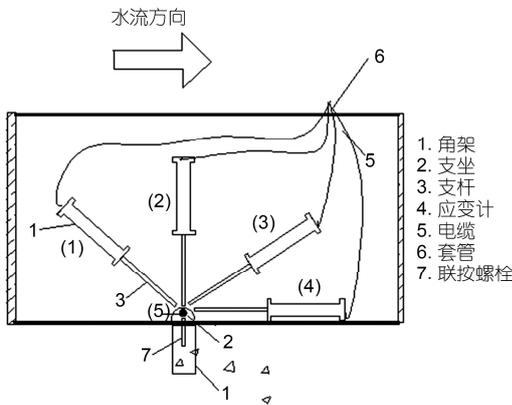


图 6 五向应变计坝体埋设位置示意图

表 3 应力成果表(2014 年 3 月 31 日)(单位: MPa)

测点	σ_x		σ_y		σ_z	
	测值	平均值	测值	平均值	测值	平均值
S51d1-2	-1.43		-1.71		-0.94	
S51d1-3	-5.13		-6.55		-4.86	
S51d1-4	-5.28	-3.77	-5.18	-4.73	-6.29	-4.25
S51d1-5	-4.42		-4.85		-3.42	
S51d1-6	-2.62		-5.36		-5.72	
S53d1-1	-5.29		-4.92		-4.86	
S53d1-2	-3.53		-3.84		-3.92	
S53d1-3	-0.73	-2.87	-1.23	-2.82	-2.05	-3.20
S53d1-4	-1.95		-1.28		-1.96	
S5d15-1	-0.13		0.67		0.04	
S5d15-2	0.73	0.30	0.62	0.65	0.62	0.33

注: 负值表示受压, 正值表示受拉.

处于微小压应力状态外, 其他各向应力均处于微小拉应力状态; 4) 从各导流底孔横向比较来看, 1#导流底孔压应力最大, 3#次之, 5#基本处于受拉状态, 由于 5#导流底孔外掺 MgO 高于另外两个部位, 混凝土产生的膨胀量也略高, 导致目前混凝土产生了一定拉应力.

4.3 测缝计成果分析

导流底孔永久测缝计布置在 3#和 6#导流底孔, 其中 3#导流底孔 10 支, 6#导流底孔 8 支, 永久测缝计位于 3#和 6#导流底孔靠近上游侧的 3 个断面上, 试验段测缝计位于 1#, 3#和 5#导流底孔的靠近下游侧位置, 虽然上下游方向桩号不一致, 但左右岸桩号与高程基本一致. 监测成果见表 4, 永久测缝计和试验段测缝计测值监测数据过程线见图 7, 分布图如图 8 和 9 所示, 永久测缝计中除 Jd6-1 测点处于微小压缩状态外(-0.32 mm), 其他测点目前均处于张开状态且大部分测值在 1~2 mm, 最大值达到了 3.34 mm; 试验段缝开合度均在 0.63 mm 以内, 由此可以看出外掺 MgO 后混凝土膨胀效果比较明显.

5 小结

通过近一年的室内试验与现场监测成果对比分析, 可以得出以下结论.

1) 外掺 MgO 膨胀剂混凝土的自生体积变形与不掺 MgO 膨胀剂混凝土早期差异明显, 室内试验的突出表现在 14 d 龄期前, 掺 MgO 混凝土呈微弱的膨胀性, 掺量为 4%的混凝土 14 d 龄期之后开始缓慢收缩, 掺量为 5%的混凝土 14 d 龄期之后膨胀量仍旧持续增加, 而不掺 MgO 混凝土则收缩的较快. 现场监测成果显示膨胀快速增长期在 20 d 左右, 之后膨胀量趋于平缓, 长期效果还有待继续观测.

2) 无论室内试验还是现场监测成果, 外掺 MgO 后的混凝土自生体积变形发展趋势基本一致. 由于现场监测仪器埋设初期可能存在施工干扰, 且受后期现场环境条件影响较大, 与室内试验相比, 同类混凝土自生体积变形的现场监测成果测值偏大, 随着掺量的增加变形显著增大.

3) 从现场埋设的测缝计监测成果来看, 外掺 MgO 后, 新混凝土与老混凝土之间的缝开合度明显比未掺 MgO 的缝开合度要小. 从五向应变计组的监

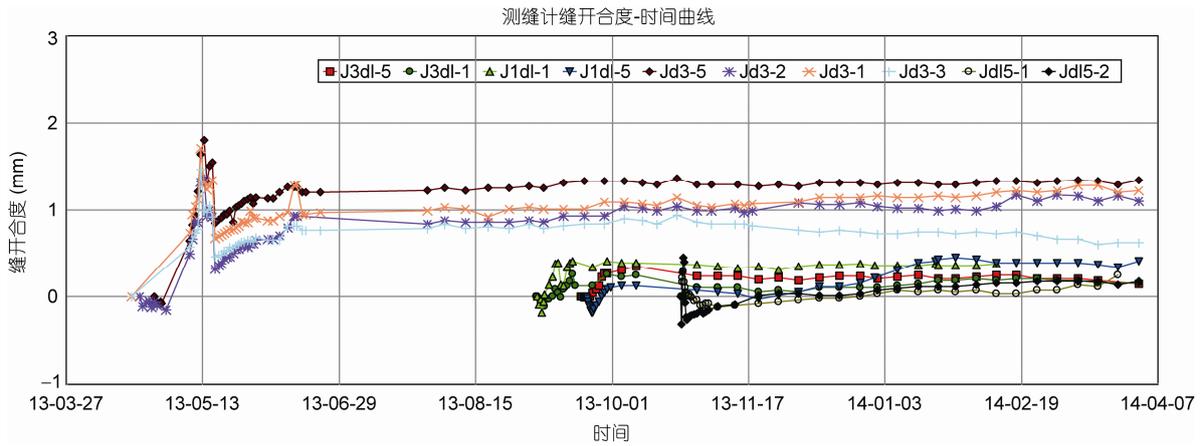


图7 部分永久监测仪器和试验段监测仪器过程线

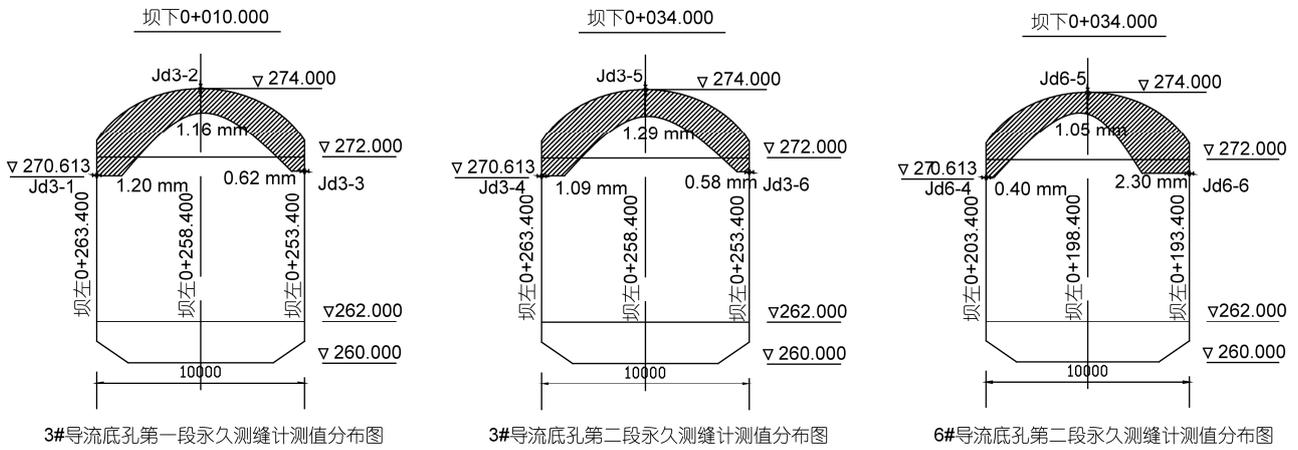


图8 永久测缝计部分监测断面分布图

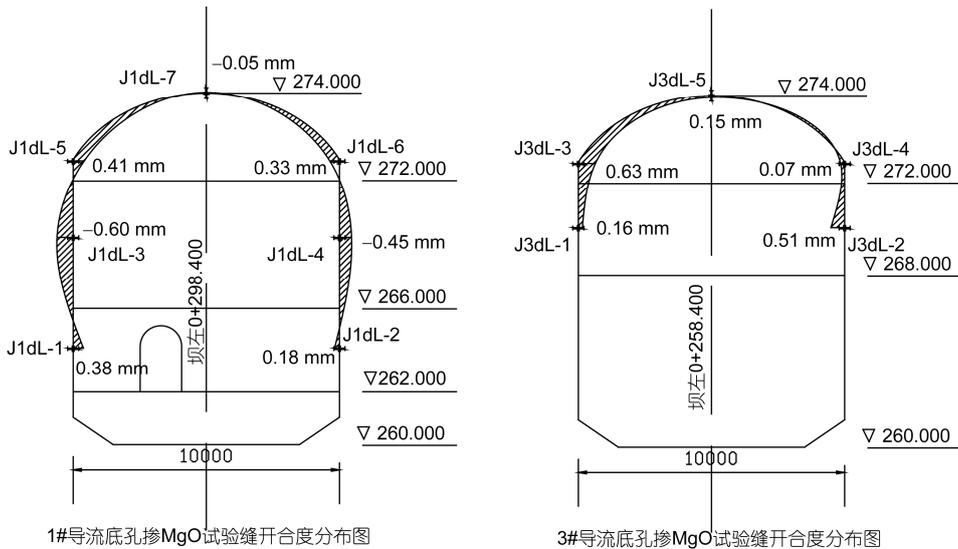


图9 导流底孔典型断面封堵段与周边混凝土缝开合度分布图

表 4 永久监测仪器和试验段监测仪器监测成果对比 (单位: mm)

永久测点				外掺 MgO 试验段测点					
仪器编号	开合度	仪器编号	开合度	仪器编号	开合度	仪器编号	开合度	仪器编号	开合度
Jd3-1	1.20	Jd6-1	-0.32	J1dl-1	0.38	J3dl-1	0.16	Jdl5-1	0.25
Jd3-2	1.16	Jd6-2	2.38	J1dl-2	0.18	J3dl-2	0.51	Jdl5-2	0.18
Jd3-3	0.62	Jd6-3	0.24	J1dl-3	-0.60	J3dl-3	0.63	Jdl5-3	-0.12
Jd3-4	1.09	Jd6-4	0.40	J1dl-4	-0.45	J3dl-4	0.07	Jdl5-4	0.21
Jd3-5	1.29	Jd6-5	1.05	J1dl-5	0.41	J3dl-5	0.15		
Jd3-6	0.58	Jd6-6	2.30	J1dl-6	0.33	J3dl-6	0.02		
Jd3-7	1.20	Jd6-7	0.97			J3dl-7	0.12		
Jd3-8	0.76	Jd6-8	3.34						
Jd3-9	0.51								
Jd3-10	0.94								
最大值	1.29		3.34		0.41		0.63		0.25
最小值	0.51		-0.32		-0.60		0.02		-0.12
平均值	0.94		1.30		0.04		0.24		0.13

注: 负值表示压缩, 正值表示张开。

测成果来看, 掺量为 4% 的混凝土处于受压状态, 而掺量为 5% 的混凝土各向均处于受拉状态, 后者膨胀

量明显大于前者, 辅助证实了外掺 MgO 混凝土的微膨胀性能, 且掺量大小与膨胀量关系密切。

参考文献

- 李家正, 陈霞, 杨华全, 等. 外掺氧化镁混凝土性能研究综述. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2010, 1: 10-14
- 刘数华, 方坤河. MgO 混凝土自生体积变形的数学模型. 水力发电学报, 2006, 25: 81-84
- 徐琼. 外掺氧化镁混凝土筑坝技术探讨. 人民长江, 2008, 39: 52-53
- 袁明道, 肖明, 杨光华. 长沙拱坝氧化镁混凝土自生体积变形的长期原型观测成果分析. 水力发电学报, 2012, 31: 168-174
- 李承木, 杨元慧. 氧化镁混凝土自生体积变形的长期试验观测结果. 水利学报, 1999, 65: 54-58
- 王述银, 覃理利, 邓建武. 掺 MgO 碾压混凝土自生体积变形试验研究. 长江科学院院报, 2006, 23: 43-46
- 陈昌礼, 冯林安, 方坤河. 氧化镁混凝土自生体积变形的反正切曲线模型. 水力发电学报, 2008, 27: 106-110
- 陈昌礼, 李承木. 氧化镁混凝土的研究与应用. 混凝土, 2006, 5: 49-53
- 朱赵辉. 金沙江向家坝水电站导流底孔外掺氧化镁试验安全监测资料分析报告. 北京中水科水电科技开发有限公司. 2014
- 戴刚, 窦立刚. MgO 膨胀剂应用技术与工程应用报告. 中国长江三峡集团公司试验中心. 2014

Study on deformation characteristics of micro expansion concrete mixed with MgO based on the measured data

ZHU ZhaoHui^{1,2}, TIAN ZhenHua^{1,2}, LV ZhiBin² & SUN JianHui^{1,2}

¹ China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

² Beijing IWHR Technology Co, Ltd, Beijing 100038, China

MgO concrete has delayed micro expansion, which can compensate shrinkage deformation in the temperature reduction process, so as to prevent or reduce the concrete crack. Based on the comparative analysis about indoor test and field monitoring results of Xiangjiaba Hydropower Station Diversion Tunnel concrete mixed with MgO, compared with MgO and without MgO doped, the similar concrete mixed with different MgO admixture influence on concrete deformation characteristics was discussed.

MgO, concrete, micro expansion, autogenous volume deformation

doi: 10.1360/N092014-00191