

外掺 MgO 混凝土快速筑拱坝技术及其应用

李承木¹ 李万军²

(1. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院科研所 四川 成都 610072 ;

2. 四川省水利水电勘测设计研究院 四川 成都 610072)

摘要 :归纳总结了采用全坝外掺 MgO 混凝土不分横缝或设少量诱导缝快速筑拱坝技术建成的混凝土拱坝 ,介绍各拱坝的工程特征、施工情况、MgO 掺量、长期观测的混凝土自生体积变形、应用新技术后的经济效益等基本情况。工程实践表明 ,采用外掺 MgO 混凝土快速筑拱坝技术建坝是成功的 ,能缩短工期并获得较大的综合经济效益。认为该技术值得在各类混凝土坝中推广应用。

关键词 :混凝土拱坝 ;外掺 MgO ;分层通仓浇筑 ;筑坝技术

中图分类号 :TV642.4 ;TV544⁺.92 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2011)06-0041-05

Application of fast damming technology admixed with MgO expansive concrete in arch dams//LI Cheng-mu¹ , LI Wan-jun²
(1. China Hydroelectric Investigation & Design Institute , Chengdu 610072 , China ; 2. Sichuan Hydroelectric Investigation & Design Institute , Chengdu 610072 , China)

Abstract : The arch dams built by means of the fast construction technology admixed with MgO expansive concrete and without arrangement of horizontal joints (or with arrangement of a few guiding joints) were summarized . Their engineering characteristics , construction situations , quantity of MgO , long-term volumetric deformation of the concrete and economic benefits after using the new technology were introduced . The engineering practices show that the fast construction technology admixed with MgO expansive concrete is successful . It can reduce the construction time and results in significant economic benefits . The proposed technology should be popularized in various kinds of concrete dams .

Key words : concrete arch dam ; MgO expansive concrete ; layered concreting without longitudinal joint ; damming technology

经过 30 多年的基础理论研究和工程应用 ,我国坝工界已总结出一套较为完整的外掺 MgO 混凝土筑拱坝技术体系 ,并全面掌握了 MgO 混凝土的物理力学性能及长期膨胀变形规律^[1-2]。在膨胀机理、变形性能、应力应变补偿理论、施工措施、均匀性控制与检测、安定性试验方法、仿真分析程序研制等方面已形成了一套完整的筑坝理论体系^[3-4] ,并在我国四川、贵州、广东等 10 多个省近 50 座大中型水利水电工程不同部位应用^[5] ,获得了成功。其中 ,长沙拱坝、三江拱坝、落脚河拱坝等 13 个拱坝工程采用了全坝外掺 MgO 混凝土不分横缝或设少量诱导缝快速筑拱坝新技术 ,目前均已成功建成^[6] ,均取得显著的技术经济效益和社会效益。在国家“十五”计划期间 ,为了将 MgO 技术用于高拱坝 ,国家电力公司主持对“高拱坝 MgO 混凝土筑坝的关键技术研究及推广应用”课题的研究 ,该课题依托小湾高拱坝(坝高

292 m)和龙滩碾压混凝土重力坝(坝高 216.5 m) ,在高坝设计计算方法、应力应变补偿、仿真程序研制、施工组织设计、温度对全级配混凝土性能的影响、外掺粉煤灰混凝土自生体积变形的提高、MgO 材料的膨胀性能及外掺工艺自动化等方面进行系统研究。该科研成果为推动这项筑坝新技术的发展及将其推广应用于 100 m 级以上高坝创造了条件。长期理论研究^[3-4,6]和工程应用实践表明 ,MgO 筑坝新技术安全可靠 ,目前已积累了大量的经验。为了进一步推广 MgO 筑坝新技术 ,制定了 2 个部颁标准^[7-8]和 2 个地方标准^[9-10] ,这 4 个行业标准作为技术保障 ,为全面推广应用该项新技术创造了条件。笔者归纳总结了采用全坝外掺 MgO 混凝土快速筑拱坝技术建成的混凝土拱坝工程 ,介绍了各拱坝的工程特征、施工情况、MgO 掺量、长期观测的混凝土自生体积变形、应用新技术后的经济效益等基本情况 ,以期类似

基金项目 :广东省水利厅科研项目(2000-21) ;水利部“948”科研基金(CT200513)

作者简介 :李承木(1939—) ,男 ,四川内江人 ,教授级高级工程师 ,从事水工建筑材料科学及 MgO 混凝土筑坝技术研究。E-mail :shby99@

1 外掺 MgO 混凝土快速筑拱坝工程

1.1 外掺 MgO 混凝土不分横缝快速筑拱坝工程

外掺 MgO 混凝土不分横缝快速筑拱坝技术首先应用于广东省阳春市长沙拱坝工程中。大坝为双曲薄拱坝,坝高 55.5 m,混凝土总量为 3.1 万 m³。该工程在拌和机口外掺 MgO,根据温控设计和仿真计算要求,按上、中、下 3 部分外掺 MgO,MgO 掺量分别为 4.5%、4.2%、3.5%。全坝不分横缝,实行通仓连续快速浇筑,大坝浇筑约每 4 d 上升 2.5 m。长沙拱坝于 1999 年 1 月 6 日开始浇筑,4 月 5 日浇至坝顶,施工期仅为 90 d。原体观测结果表明,大坝自生体积膨胀变形多数超过 160×10⁻⁶,基本满足设计要求。工程正常运行至今已超过 12 a,掺 4.5% MgO 混凝土的自生体积膨胀变形的平均值长期稳定在 160×10⁻⁶~180×10⁻⁶之间。

长沙拱坝采用外掺 MgO 混凝土不分横缝快速筑拱坝技术,是温控设计和简化温控措施的重大突破。利用混凝土自身膨胀变形补偿混凝土温降收缩,对简化温控措施、加快施工进度、保证工程质量、提高经济效益均十分有效。该技术的突出特点是:不分横缝,分层通仓浇筑,水平整体上升,以坯层台阶式连续滚动推进,连续快速全天候浇混凝土(夏季也是一个很好的施工季节),不埋冷却水管,不需封

拱灌浆。该技术彻底摒弃了传统修建混凝土拱坝需分横缝、柱状、跳块、薄层浇筑,需封拱灌浆等诸多制约筑坝速度的施工工序,极大地加快了施工速度。大坝浇筑多采用垂直与水平运输两者合二为一的施工方案。其后采用同样技术施工的坝美拱坝和沙老河拱坝的基本情况见表 1 和表 2。

需要指出的是,沙老河拱坝浇筑后不到 1 个月,因突受寒潮袭击而形成过大的温度梯度,混凝土的坍塌度又太小,影响了施工质量,使坝体产生了 5 条贯穿性裂缝(左坝肩 2 条,右坝肩 3 条,最大缝宽 7~8 mm)。灌浆处理后,大坝已安全正常运行至今。

1.2 外掺 MgO 混凝土设诱导缝通仓快速筑拱坝工程

三江拱坝工程位于贵州省贵阳市北郊,大坝为单心圆薄拱坝,坝高 71.5 m,混凝土总量为 3.8 万 m³。全坝采用在拌和机口外掺 MgO 混凝土施工,根据温控设计要求和压蒸试验结果,MgO 掺量为 4.5%,全坝实行通仓连续快速浇筑,每个浇筑层高 2.5 m,采用水平整体上升,并以台阶方式连续滚动推进浇筑大坝混凝土。通过仿真分析发现,在浇筑大坝上部时气温高,温降收缩大,导致两岸坡的约束大(拉应力超过 3 MPa),需要应变量达 200×10⁻⁶方可完全补偿混凝土温降收缩,而仅凭 MgO 混凝土的自生体积膨胀不能完全补偿温降收缩。由此提出有针对性地设置诱导缝,以达到释放超标拉应力的目的。经计算,需在 0.7H(H 为坝高)以上位置设置

表 1 各类拱坝工程混凝土的原材料及施工配合比

编号	工程名称	90 d 强度等级	水泥		水胶比	粉煤灰		MgO 掺量/%	砂率/%	$\rho_{\text{胶凝材料}}/\rho_{\text{砂}}:\rho_{\text{石}}$	外加剂		坍落度/cm	V _c 值/s
			品种	标号		种类	掺量/%				型号	掺量/%		
1	长沙拱坝	C20	硅酸盐	42.5	0.49	205	黄埔灰	30	3.5~4.5	27.0	1:2.85:7.71	ZB-1A	0.6	3~5
2	沙老河拱坝	C20	普硅	42.5	0.55	173	贵阳灰	40	4.0~5.5	23.2	1:3.03:10.04	ZB-1A	0.7	1~4
3	坝美拱坝	C20	普硅	32.5	0.55	229	黄埔灰	20	5.5	28.0	1:2.43:6.66	GCL-3K6	1.7	3~5
4	三江拱坝	C20	普硅	42.5	0.57	175	贵阳灰	30	4.5	24.3	1:3.09:9.79	ZB-1A	0.7	2~4
5	长潭拱坝	C20	普硅	32.5	0.52	221	湘潭灰	20	5.5~5.75	25.5	1:2.45:6.61	FDN-200	0.6	3~5
6	落脚河拱坝	C20	普硅	42.5	0.50	180	安顺灰	30	5.5	24.0	1:2.99:9.46	YQ-1	1.0	2~5
7	马槽河拱坝	C20	普硅	32.5	0.53	220	大龙灰	40	6.0	28.0	1:2.97:7.64	ADD-3	0.8	2~5
8	老江底拱坝	C20	普硅	42.5	0.56	210	安顺灰	30	6.0	35.0	1:3.54:6.57	ADD-3	0.8	2~5
9	鱼筒河 RCC 拱坝	C15	普硅	42.5	0.55	158	遵义灰	55	5.0	33.0	1:4.58:9.31	NF-A	0.75	4~8
		C20	普硅	42.5	0.55	173	遵义灰	40	5.0	35.0	1:4.31:8.01	NF-A	0.75	
10	龙首 RCC 拱坝	C20	硅酸盐	42.5	0.48	171	永昌灰	66	4.3	30.0	1:3.77:8.79	NEA	0.90	5~7
		C20	硅酸盐	42.5	0.43	205	永昌灰	53	4.3	32.0	1:3.29:6.99	NF-C	0.05	
11	石门子 RCC 拱坝	C15	硅酸盐	42.5	0.55	160	玛纳斯灰	65	2.0	31.0	1:4.17:9.28	JS(YQ)	0.9X(0.01)	6
		C20	硅酸盐	42.5	0.50	190	玛纳斯灰	55	2.0	31.0	1:3.45:7.68	JS(YQ)	0.9X(0.01)	
12	黄花寨 RCC 拱坝	C20	普硅	42.5	0.54	161	安顺灰	60	6.0	34.0	1:4.73:9.19	ADD-3	0.8	7~10
		C20	普硅	42.5	0.54	183	安顺灰	40	6.0	39.0	1:4.70:7.32	ADD-3	0.8	
13	那恩 RCC 拱坝	C15	普硅	42.5	0.60	176	田东灰	55	4.5	34.0	1:4.25:8.25	FDN-4	0.7	3~5
		C15	普硅	42.5	0.55	208	田东灰	55	4.5	38.0	1:3.88:6.33	FDN-4	0.7	
14	河湾拱坝	C20	普硅	42.5	0.53	217	贵电灰	40	5.0	34.0	1:3.18:6.31	TWJSFPC	1.0	2~5

注 ①编号 1 的岩石类别为花岗岩,2 和 4 为白云质灰岩,5 为灰岩和砂岩,10 和 11 为砂砾石,其余均为石灰岩。②各工程均使用Ⅱ级粉煤灰。③编号 2、4、6、7 大坝混凝土为 4 级配混凝土,其余均为 3 级配混凝土。④编号 9~13 中第 1 行为大坝混凝土的原材料及配合比,第 2 行为坝体上游面 2 级配碾压混凝土(RCC)防渗体的原材料及配合比。

表 2 全坝外掺 MgO 混凝土通仓连续浇筑拱坝工程基本情况

编号	工程名称	建设省份 (县、市)	大坝浇筑 起止时间	筑坝 实际 用时/d	坝高/ m	坝顶 宽/m	坝底 宽/m	坝顶 弧长/ m	混凝土 总量/ 万 m ³	装机 容量/ 万 kW	MgO 掺量/ %	自生体积 变形/10 ⁻⁶	分缝 情况
1	长沙拱坝	广东阳春	1999-01-06— 1999-04-05	90	55.5	3.87	9.66	144.96	3.1	0.126	3.5~4.5	160~180	不分横缝
2	沙老河拱坝	贵州贵阳北郊	2001-04-16— 2001-10-18	184	61.2	4	12.80	185.00	5.3		4.0~5.5	120~150	不分横缝
3	坝美拱坝	广东乳源	2003-02-28— 2003-07-29	153	53.0	3.5	10.00	121.70	3.7	0.8	5.5	>120	不分横缝
4	三江拱坝	贵州贵阳北郊	2002-12-13— 2003-06-17	186	71.5	4	10.48	137.50	3.8		4.5	130~160	分2条诱导缝
5	长潭拱坝	广东翁源	2004-04-21— 2004-10-28	190	53.0	3	9.50	124.00	2.9	0.5	5.5~5.75	120~160	分2条诱导缝
6	落脚河拱坝	贵州大方	2006-01-05— 2006-11-24	285	81.0	4	15.80	195.60	9.6	2.0	5.5	80~130	分4条诱导缝
7	马槽河拱坝	贵州铜仁	2007-03-07— 2007-11-15	180	69.5	4	12.00	142.10	3.8	1.0	6.0	130~160	分4条诱导缝
8	老江底拱坝	贵州兴义	2007-12-20— 2008-10-20	280	67.0	5	16.00	128.00	6.5	10.0	6.0	>120	分2条诱导缝
9	鱼筒河 RCC 拱坝	贵州息烽	2003-11-15— 2005-04-06	360	81.0	4	16.00	167.30	11.0		5.0	>40	分2条诱导缝、 2条横缝
10	龙首 RCC 拱坝	甘肃张掖	2000-04-01— 2001-06-16	300	80.0	5	13.50	140.80	6.8	5.2	4.3	50~60	分2条诱导缝
11	石门子 RCC 拱坝	新疆玛纳斯	1999-04-01— 2000-05-31	380	109.0	5	31.00	176.50	21.0	0.64	2.0	>20	分4条诱导缝、 1条横缝
12	黄花寨 RCC 拱坝	贵州长顺	2008-01-02— 2010-12-30	650	108.0	6	26.00	253.40	28.5	6.0	6.0	40~80	分2条诱导缝
13	那恩 RCC 拱坝	广西那坡	2009-08-01— 2010-09-29	330	76.5	5	14.00	207.70	3.2	2.55	4.5	>50	分4条诱导缝
14	河湾拱坝	贵州平塘	建设中 (2011-05-31—)		81.0	5	18.00	145.00	10.1	2.0	5.0		分6条诱导缝

注:黄花寨大坝在浇至 70 余 m 时因非工程原因于 2009 年 4 月停浇,又于 2010 年 4 月恢复浇筑。

2 条诱导缝。施工时在两坝肩各设置了 1 条诱导缝。诱导缝采用混凝土预制板成缝技术,确保混凝土的快速施工,缝内埋设重复灌浆管以便蓄水前灌浆。大坝于 2002 年 12 月 13 日开始浇筑至 2003 年 6 月 17 日结束,历时 186 d。施工中,冬季上游基坑自然进水,除下游堆渣对坝体下部坝面进行保护外,中上部坝面未采取任何保温措施。

原体观测结果表明,大坝自生体积膨胀变形量长期稳定在 $130 \times 10^{-6} \sim 160 \times 10^{-6}$ 之间;2 条诱导缝被拉开,最大缝宽 4~5 mm,坝体其他部位均未发现裂缝;拱座测缝计反映混凝土与岩石之间的裂缝多数为受压缝,少数为张开缝,其缝宽多在 0.1 mm 内,不再随时间变化。灌浆处理后大坝已安全正常运行至今。实践证明,除 MgO 的补偿作用外,设置诱导缝释放拉应力的作用十分明显,达到了设计预期目标,保证了工程质量。

诱导缝的设计主要考虑混凝土的膨胀量,而混凝土的膨胀量是温度和龄期的函数,温度越高,膨胀量越大。考虑温度对自生体积膨胀变形的影响,当仿真计算膨胀量可能无法满足设计要求时,为了释放坝体内过大的超标拉应力,有必要在两坝肩各设置 1~2 条诱导缝。这是对外掺 MgO 混凝土不分横缝快速筑拱坝技术的创新,也是设计理念的深化和完善。三江拱坝设诱导缝是经过精准仿真计算后的

成功典型实例,其设计方法合理,符合工程实际,值得推广应用。贵州省内的几座外掺 MgO 混凝土拱坝诱导缝的缝距在河床部位较大,一般都在 100 m 左右,而两岸坡坝段的缝距较小,一般为 15~20 m。其后采用同样技术在广东省修建了长潭拱坝(该坝体混凝土在温度高达 52.7℃ 时照常施工),在贵州省又成功修建了落脚河、马槽河、老江底等 3 座混凝土拱坝,各工程的基本情况见表 1、表 2。

1.3 外掺 MgO 碾压混凝土拱坝工程

贵州省息烽县境内的鱼筒河水利枢纽工程,其大坝为碾压混凝土双曲薄拱坝,坝高 81 m。根据温控设计要求,除采用内含高镁膨胀水泥外,在大坝拱端还分了 2 条横缝、2 条诱导缝。实践证明,合理分缝显著减小了超标拉应力。该大坝浇筑层高 2m,每层间隔时间为 5~6 d,连续水平整体上升,碾压混凝土的 V_c 值控制在 4~8 s,用机械平仓铺料,按碾压程序进行碾压,其防渗体为 2 级配变态混凝土,该大坝实际筑坝时间约为 1 a,共浇碾压混凝土 11 万 m³。监测结果表明:相对密度的平均值达 98.7%~99.7%,抗压强度平均值超标达 31%~45%,碾压混凝土的自生体积膨胀变形量达 40×10^{-6} 以上。工程完工后,除 1 条诱导缝有微小的张开度外,其余 3 条均呈闭合状态,因此尚未进行灌浆处理,大坝蓄水已安全正常运行至今。其后采用同样的外掺 MgO

技术在贵州省又修建了黄花寨碾压混凝土拱坝,在甘肃省和新疆维吾尔自治区成功建成了龙首^[1]和石门子^[12]座碾压混凝土拱坝。此外,为了解决夏季施工问题,在广西壮族自治区那坡县成功修建了那恩碾压混凝土拱坝(坝高 26 m 以上外掺 MgO),各工程的基本情况见表 1、表 2。

朱伯芳^[13]指出:为了避免目前碾压混凝土施工在夏季多停工的现象,最好的办法就是坝体采用外掺 MgO 混凝土施工,并建议设法提高 MgO 掺量。潘家铮曾指出:现在夏季变成很好的浇筑季节,温度应力可以补偿,MgO 混凝土筑坝是革命性的措施,将 MgO 混凝土和碾压混凝土二者结合起来,则“革命”较彻底。普定碾压混凝土重力拱坝最好采用 MgO 微膨胀混凝土施工。实践证明这些技术观点都是正确的。在碾压混凝土中外掺 MgO 能实现夏季继续施工的目的,可加快施工速度,放宽浇筑温度;以诱导缝替代横缝,可改善混凝土质量,提高坝体抗渗能力,增强坝体耐久性能。因此可以认为外掺 MgO 混凝土筑拱坝技术是有效的施工技术措施,所起的综合效应对工程有利,值得推广应用。

2 长期观测的拱坝混凝土自生体积变形

贵州省内的沙老河拱坝、三江拱坝及广东省的长沙拱坝长期观测的大坝混凝土自生体积膨胀变形量列于表 3 中。从表 3 可以看出:①外掺 MgO 混凝土自生体积变形均随 MgO 掺量的增加和观测龄期的延长而增大,并随着温度的增高而增大。②外掺 MgO 混凝土自生体积变形主要发生在最高温升之后、有显著的降温之前,具有延迟微膨胀特性。大量研究结果表明,约 70% 的膨胀量是在 7 d 龄期之后发生。③MgO 混凝土自生体积膨胀变形是长期稳定不可逆的,其膨胀变形量是永久性的,且室内外变形规律一致^[1]。

由文献[6]可知,沙老河和三江拱坝坝体混凝土早期温度高,膨胀增量大,1 a 后的温度已接近稳定温度场,其膨胀发展逐年变小,到第 6 年和第 4 年分别还有 $2 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6}$ 和 $5 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$ 的膨胀增量,这对稳定补偿应力极为有利。一般龄期 1 a 以后的膨胀增量可占总膨胀量的 10% 左右。另外,广东地区坝体起始温度较高,其膨胀变形的稳定时间相对较早,通常在龄期 1 a 后基本趋于稳定。据文献[13]计算,只要常态混凝土有 100×10^{-6} 的自生体积膨胀变形,在华南地区可省去预冷骨料和冷却水管工序而进行通仓浇筑,在其他地区,只有当混凝土自生体积膨胀变形量达 $150 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 时方可省去预冷骨料和冷却水管工序执行通仓浇筑,这

是推广的基本条件。

文献[6]指出,全坝外掺 6% 的 MgO 的马槽河拱坝混凝土自生体积膨胀变形量较大,1 a 龄期的膨胀量达 $120 \times 10^{-6} \sim 165 \times 10^{-6}$,其膨胀变形过程和规律也较好。因为工程所用水泥的质量较好且不收缩,单方胶材用量和 MgO 掺量都较高,这些因素有利于提高预期膨胀量。大量试验研究表明,膨胀量大小与水泥的质量组成及性质、MgO 质量及掺量、混合材料种类及掺量、环境温度、外加剂品种、单位胶材用量、级配材料组成、施工质量、外掺均匀性等诸多因素密切相关。

3 工程经济效益分析

坝高 50 ~ 70 m 的混凝土拱坝常规施工期为 2 ~ 3 a,应用新技术后的施工期仅为 4 ~ 7 个月;坝高 100 m 级的混凝土拱坝常规施工期为 3 ~ 4 a,应用新技术后的施工期约为 1 a^[4]。与传统筑坝技术相比,应用新技术后坝高 50 ~ 100 m 级的水电工程可提前 1 a 多发挥效益。新技术的综合经济效益相当于建坝投资的 45% 以上(视工程规模和装机容量大小而定)。经济效益主要体现在省去温控措施(据统计,温控费用占工程投资的 4% ~ 6%)、缩短工期、节省工程投资和提前发电等方面。长沙拱坝、坝美拱坝、长潭拱坝采用新技术后分别提前投产 14 个月、12 个月、14 个月,所取得的经济效益见表 4。

采用 MgO 混凝土并适当进行表面保温和养护,有利于解决混凝土坝的开裂问题,可全部或部分取代传统的温控措施,实现长块、厚层、通仓连续浇筑,可以全天候施工,夏季也是一个很好的施工季节,从而大幅度降低工程造价,简化施工工艺,缩短工期,具有良好的技术经济优势和应用前景。据统计,小型水电站工程提早发挥的效益相当于坝体投资的 30% 以上。发电站装机容量越大,其经济效益越显著。贵州落脚河水电站由于浇筑拱坝时采用了新技术,缩短了 1 a 工期,获得提前发电等各项直接经济效益达 1 365 万元。贵州东风电站高拱坝基础回填处理工程采用外掺 MgO 混凝土施工,减少了分缝分块,不仅在一个汛期提前完成了混凝土浇筑任务,而且为工程节约了 1 a 施工期,为国家避免了 2.04 亿元的电能损失,其间接经济效益则更为显著。某高拱坝坝高 292 m,底宽 73 m,电站装机容量为 420 万 kW,年发电量为 188.9 亿 kW·h。若在坝基 36 m 强约束区采用 MgO 混凝土快速施工,至少可提前 1 a 发电,可产生 66 亿元的电价收益,简化(或取消)温控措施可节约工程费约 20 亿元,再加上缩短施工工期所节省的开支、减少的贷款利息等,预计

表 3 大坝混凝土的自生体积膨胀变形量

工程名称	MgO 掺量/%	仪器编号	最高温度/℃	各观测龄期的自生体积变形 /10 ⁻⁶												
				3 d	7 d	14 d	28 d	60 d	90 d	180 d	360 d	540 d	720 d	1080 d	1440 d	1800 d
沙老河拱坝	4.0	N1	28.0	12.0	14.5	51.9	56.1	64.3	67.8	74.3	89.5	91.5	93.8	101.3	105.4	109.4
	4.0	N2	29.0	30.2	45.0	50.7	58.8	74.7	77.8	88.8	97.4	99.0	101.2	104.2	110.0	115.7
	4.0	N3	28.3	14.2	20.2	31.5	37.6	53.2	59.6	67.2	77.5	78.4	82.8	88.3	97.1	103.9
	4.7	N4	29.8	13.0	18.3	35.9	58.7	77.7	88.9	93.8	113.1	117.1	122.2	132.1	133.0	135.6
	4.7	N5	33.8	20.1	28.6	35.1	50.7	63.3	81.7	85.6	114.0	116.0	123.3	126.6	134.9	141.3
	4.7	N6	30.4	12.5	16.6	25.5	49.0	63.5	72.8	78.6	98.5	100.0	105.6	119.5	123.3	127.0
	4.9	N7	37.2	23.0	34.1	51.4	67.7	87.9	95.3	107.9	123.8	125.0	137.6	138.4	138.6	139.5
	4.9	N8	36.7	18.6	27.0	42.2	53.2	64.5	69.6	81.1	105.2	110.0	114.9	116.8	124.0	130.9
	4.9	N9	32.4	22.3	31.7	44.6	56.4	76.1	81.8	83.3	107.0	112.0	116.7	119.7	120.0	121.0
	4.9	N10	40.4	25.8	37.4	56.5	78.3	89.9	93.9	112.0	111.2	114.0	117.5	118.7	129.0	135.4
	4.9	N12	33.3	11.9	14.4	26.8	46.0	64.6	80.5	101.4	104.6	105.4	107.5	116.7	121.0	123.2
	4.9	N13	33.8	18.6	27.7	41.9	52.0	61.4	70.3	90.5	93.6	96.7	111.1	112.8	115.4	117.5
	4.9	N14	36.9	21.7	32.0	45.0	57.2	60.5	63.8	82.9	115.8	162.2	180.1	192.7	204.5	216.2
三江拱坝	4.5	N2	27.3	18.0	27.0	36.0	45.0	55.0	58.5	70.4	78.8	79.0	86.2	94.3	99.4	
	5.0	N5	24.1	8.5	12.0	16.5	18.3	24.0	29.7	52.3	79.4	80.2	82.4	91.5	98.6	
	5.0	N8	25.1	13.8	19.5	25.5	31.0	51.8	64.2	68.9	105.6	108.7	125.3	130.0	138.0	
	5.0	N9	31.3	7.6	10.3	13.7	25.4	48.7	62.4	77.7	109.6	110.8	128.0	133.0	141.0	
	5.0	N15	33.1	22.5	33.2	43.7	53.4	69.8	79.7	81.2	109.0	120.0	142.7	146.0	150.0	
	5.0	N16	29.6	17.7	25.4	32.6	39.8	55.5	64.3	78.0	107.2	123.0	137.2	139.4	145.3	
	5.0	N18	33.9	21.0	32.2	42.0	52.4	62.0	68.2	103.0	104.8	136.7	136.9	140.6	150.0	
长沙拱坝	3.5	N1	35.0	6.3	14.4	21.5	30.2	44.9	51.7	63.2	72.6	80.7	86.2	91.3	92.5	94.5
	3.5	N2	28.0	6.7	20.3	30.0	37.9	52.2	59.6	69.4	81.1	88.1	92.8	95.0	96.2	98.0
	3.5	N3	34.1	14.3	26.0	39.9	52.6	65.9	72.6	83.4	89.2	94.1	98.0	102.3		
	3.5	N4	36.8	8.0	20.4	34.1	42.9	59.8	70.1	83.6	92.4	102.0	110.3	122.1		
	4.2	N8	35.3	11.3	16.4	34.0	62.6	91.8	103.8	132.7	160.7	174.1	182.0	193.7		
	4.2	N9	35.1	11.2	23.5	31.2	42.3	61.5	70.5	87.6	100.4	109.1	116.3	125.1	135.0	147.0
	4.2	N10	37.7	14.2	31.5	49.0	68.2	93.2	104.4	119.2	130.0	138.6	146.3	155.5	165.0	175.0
	4.2	N11	36.9	10.4	25.2	41.1	66.9	91.9	102.3	125.8	140.2	147.5	154.3	162.3		
	4.2	N12	35.1	10.6	18.4	27.2	46.5	67.3	75.7	92.8	102.2	108.4	113.0	118.5		
	4.5	N5	39.2	16.6	30.3	43.2	61.6	83.5	94.6	116.0	131.7	142.5	150.3	159.5		
	4.5	N6	38.7	16.9	35.7	55.3	75.7	108.2	124.6	149.3	168.7	183.6	192.5	199.0		
	4.5	N13	44.7	15.2	30.2	45.4	63.1	84.0	95.6	110.5	118.0	123.9	127.7	136.8	142.5	155.0
	4.5	N14	46.1	12.7	30.7	47.0	59.3	85.4	96.0	113.1	125.8	133.5	142.4	151.0	160.0	165.0
	4.5	N15	43.3	14.2	19.5	56.8	75.8	111.2	125.7	151.3	175.2	189.6	198.5	201.7		
	4.5	N16	42.2	11.2	29.7	47.4	61.3	78.1	86.4	97.4	109.1	119.3	126.7	136.2		

表 4 外掺 MgO 混凝土工程效益

工程名称	MgO 混凝土拱坝造价/万元	节省工程费		增加电费收入		减少施工管理费		工程效益合计	
		金额/万元	所占比例/%	金额/万元	所占比例/%	金额/万元	所占比例/%	金额/万元	所占比例/%
长沙拱坝	879.8	45.3	5.2	257.1	29.2	90.8	10.3	393.2	44.7
坝美拱坝	847.9	60.1	7.1	1111.6	131.1	77.8	9.2	1249.5	147.4
长潭拱坝	751.1	41.1	5.5	209.0	27.8	77.8	10.4	327.9	43.7

可获得经济效益近 100 亿元。

4 结 论

a. 采用外掺 MgO 混凝土快速筑拱坝技术施工，具有不分横缝或设少量诱导缝 ,分层通仓浇筑 ,水平整体上升 ,连续快速全天候浇混凝土 ,不埋冷却水管 ,不需封拱灌浆等优点。该施工技术已被实践证明是成功的 ,并能获得较好的综合经济效益 ,值得推广应用。

b. 该项新技术涉及混凝土材料试验、设计、施工、原体监测等多方面 ,尤其要重视材料试验 ,它 为设计、施工、仿真分析提供基本资料 ,因此十分重要 ,应提前开展材料试验工作。

c. 将该项新技术用于高坝理论上是成熟的 ,关键是要把 好施工技术关 ,精心施工 ,并提高 MgO 材料的质量及膨胀性能 ,使混凝土自生体积膨胀量达到 150×10⁻⁶ ~ 200×10⁻⁶ ,便可在各类混凝土坝中全面推广应用。

(下转第 84 页)

Instrumentation, 1997(31):1005-1007.

[38] QU Jian-wu, MURAI Y, YAMAMOTO F. Simultaneous PIV/PTV measurement of bubble and particle phase in gas-liquid two-phase flow based on image separation and reconstruction [J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 16(6):756-766.

[39] OAKLEY T R, LOTH E, ADRIAN R J. A two-phase cinematic PIV method for bubbly flows [J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(3):707-712.

[40] CHEN Y, SAGA T, HU H, et al. Simultaneous velocity measurement of liquid-solid two-phase flow by using a PIV-PTV combined system [J]. Journal of the Visualization Society of Japan, 2000, 20(S2):159-162.

[41] 杨斌, 王元, 张洋. 风沙流中气固两相速度场的 PIV-PLIF 测量 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7):101-104.

(收稿日期 2011-04-13 编辑 骆超)

(上接第 45 页)

参考文献 :

[1] 李承木. MgO 混凝土自生体积变形的长期研究成果 [J]. 水力发电, 1998(6):53-57.

[2] 李承木. 外掺 MgO 混凝土的基本力学与长期耐久性性能 [J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(5):30-35.

[3] 陈其武, 李晓新. 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.

[4] 刘振威. 外掺 MgO 混凝土不分横缝快速筑拱坝新技术应用研究成果总报告 [R]. 广州 : 广东省水利厅, 2005.

[5] 李承木, 袁明道. 外掺 MgO 微膨胀混凝土筑坝技术应用综述 [J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(6):57-63.

[6] 贵州省水电设计院, 贵州省水利厅, 贵州中水建设项目管理公司, 等. 全坝外掺 MgO 微膨胀混凝土快速建拱坝技术应用研究成果汇编 [R]. 贵阳 : 贵州省水电设计院, 2008.

[7] WJM0035—1994 水利水电工程轻烧氧化镁材料品质技术要求 [S].

[8] WJM 0023—1995 氧化镁微膨胀混凝土筑坝技术暂行规定 [S].

[9] DB44/T 703—2010 外掺氧化镁混凝土不分横缝拱坝技术导则 [S].

[10] DB52/T 720—2010 全坝外掺 MgO 混凝土拱坝技术规范 [S].

[11] 杨家修, 崔进, 张世杰. 龙首水电站碾压混凝土拱坝结构设计 [J]. 水力发电, 2001(10):15-17, 41.

[12] 刘光廷, 李鹏辉, 胡显, 等. 塔西河碾压混凝土拱坝结构及施工期蓄水措施 [C]//碾压混凝土筑坝技术国际会议论文集. 成都 : 中国水力发电工程学会, 1999.

[13] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术 [J]. 水力发电学报, 2000(3):1-13.

(收稿日期 2011-01-19 编辑 骆超)

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63 , CN32-1117/TV , ISSN1000-1980 , 双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊, 主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章, 可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

《河海大学学报(自然科学版)》创办于 1957 年, 是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊, 在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中, 绝大部分为国家科技攻关(重点) 项目和各种科学基金资助项目的研究成果, 部分达到了国内领先和国际先进水平, 为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议, 发挥了较大的社会效益和经济效益, 深受工程界和科技界赞许, 并获得中国高校精品科技期刊奖以及中国期刊方阵“ 双效期刊 ”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版, 国内外公开发行, 每期定价 15.00 元, 全年 6 期, 共 90.00 元。欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系。

编辑部地址 210098 南京市西康路 1 号 《河海大学学报(自然科学版)》编辑部
电话/传真 025-83786343 ; E-mail :xb@hhu.edu.cn
http://kbb.hhu.edu.cn/web/indexxb.asp?id_id=53