

全坝外掺 MgO 混凝土筑坝技术在贵州省拱坝工程中的应用

陈昌礼¹, 申献平², 陈学茂³

(1. 贵州师范大学材料与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州省水利水电勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550002; 3. 贵州新中水工程有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为促进外掺 MgO 混凝土的推广应用和深入研究,对贵州省采用全坝外掺 MgO 混凝土筑坝技术建成 1 a 以上的 8 座拱坝的混凝土变形、诱导缝设置与施工等情况进行了总结和分析。分析结果表明:拱坝结构的超静定特性为外掺 MgO 混凝土在膨胀变化过程中形成预压应力提供了良好的约束环境;按照现行的水泥砂浆压蒸法或一级配混凝土压蒸法确定的 MgO 掺量制备外掺 MgO 混凝土,坝体混凝土的实测膨胀量多为 $50 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$,未完全达到补偿温降收缩所需的设计期望值;设置诱导缝是充分利用外掺 MgO 混凝土筑坝技术优越性的有效措施;在碾压混凝土中外掺 MgO 材料,有利于同时发挥碾压混凝土和外掺 MgO 混凝土快速、经济筑坝的优越性。

关键词:外掺 MgO 混凝土;拱坝;筑坝技术;诱导缝;自生体积变形;贵州省

中图分类号:TV431;TV642.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)05-0084-05

Application of damming technology with MgO admixed concrete used in the whole dam in Guizhou's arch dam projects//CHEN Changli¹, SHEN Xianping², CHEN Xuemao³ (1. School of Materials and Architecture Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Survey and Design Research Institute for Water Resources and Hydropower, Guiyang 550002, China; 3. Guizhou Xinzhongshui Engineering Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to promote the application and deep research of MgO-admixed concrete, the conditions of concrete deformation, configuration and construction of induced joints for 8 arch dams in Guizhou Province were analyzed. These arch dams were constructed with MgO-admixed concrete in the whole dam body and have been in operation for more than a year. Results show that the statically indeterminate property of the arch dam structure provides a good constrained environment for MgO-admixed concrete to form compressive pre-stresses during the concrete expansion process. The amount of MgO in the concrete can be determined by cement mortar autoclave method or one-grade concrete autoclave method. The measured expansion capacity of dam concrete with such amount of MgO is about $50 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$, which does not reach the expected value to fully compensate the shrinkage crack induced by temperature drop. Configuration of induced joints is an efficient measure to take full advantage of the MgO-admixed concrete damming technology. Once the MgO materials is mixed into the roller compacted concrete (RCC), the fast and economical superiority of RCC and MgO-admixed concrete in dam construction can take great effect.

Key words: MgO-admixed concrete; arch dam; damming technology; induced joints; autogenic volume deformation; Guizhou Province

在混凝土中外掺氧化镁 (MgO) 材料有 3 种方式:一是在生产混凝土时,使用共磨外掺 MgO 水泥(适量的 MgO 熟料(即轻烧镁砂半成品)与水泥熟料共同粉磨而成的水泥);二是在生产混凝土时,使用共混外掺 MgO 水泥或厂掺 MgO 水泥(即水泥成品与适量的粉状 MgO 膨胀剂在水泥厂均匀混合而成的水泥);三是在混凝土拌和现场,将适量的粉状 MgO 膨胀剂成品直接加入拌和机中,与水泥、砂子、石子、水等原材料一起拌制混凝土(简称机口外掺

MgO 混凝土)。在设计、建造混凝土挡水坝时,在混凝土中外掺 MgO 材料,同时采用与之配套的结构设计、坝体施工、质量检测、原型观测等手段,利用 MgO 混凝土的延迟微膨胀来补偿大坝混凝土在温降过程中产生的体积收缩,提高混凝土自身的抗裂能力,这一技术称为外掺 MgO 混凝土筑坝技术。

大量的试验研究和工程应用成果^[1-9]表明,外掺 MgO 混凝土的自生体积变形呈现良好的延迟微膨胀特性,其主要的膨胀量发生在混凝土浇筑后 7 ~

180 d 之间,延迟膨胀变形过程与大体积混凝土漫长的温降收缩过程基本同步,后期的膨胀变形逐渐趋于稳定,混凝土的膨胀量可以部分甚至全部补偿温降收缩量;采用外掺 MgO 混凝土筑坝技术,能够使坝体混凝土产生一定的预压应力,从而削减甚至抵消坝体混凝土在温降过程中产生的拉应力,达到简化坝体混凝土温控措施、缩短建设工期、节省工程投资的目的。此外,有学者还对 MgO 自身及其在水泥浆体、水泥-粉煤灰浆体中的反应规律和机理进行了研究,为 MgO 在混凝土中的应用提供了理论支撑^[10-12]。

截至 2016 年底,外掺 MgO 混凝土筑坝技术已在我国 17 个省的 50 多个水利水电工程中得到应用^[7],外掺 MgO 混凝土已用于重力坝基础约束区、碾压混凝土坝基础垫层、大坝基础填塘、导流洞和导流底孔封堵、混凝土防渗面板、基础与裂隙灌浆、大坝纵缝与拱坝横缝灌浆、高压管道外围回填、中型拱坝全坝段,既有常态混凝土,也有碾压混凝土^[1-2]。贵州省采用该技术建成的工程最多,达到 16 个。尽管如此,由于全坝外掺 MgO 混凝土筑坝技术存在不少需要深入研究和在应用中不断积累经验的问题,因此工程技术人员对全坝外掺 MgO 混凝土存在种种担忧,造成采用全坝外掺 MgO 混凝土筑坝技术的工程仍然是极少数。本文对贵州省利用外掺 MgO 混凝土建设全拱坝的情况进行总结分析,以期对外掺 MgO 混凝土的推广应用和深入研究提供借鉴。

1 应用简况

贵州省采用全坝外掺 MgO 混凝土筑坝技术建成的第一个工程是位于贵阳市北郊的沙老河水库。该工程的主要任务是城市供水,它是贵阳市北郊水厂的主要水源^[9,13]。沙老河水库枢纽由大坝、溢洪道、取水口、底孔等组成,总库容为 1577 万 m³,正常蓄水位为 1236 m,死水位为 1197 m,大坝为不对称三圆心双曲混凝土拱坝,最大坝高 61.7 m。沙老河拱坝采用全坝外掺 MgO 常态混凝土浇筑而成,未设横缝,混凝土强度等级为四级配 C₉₀20,抗渗等级为 W6,MgO 掺量为 4.0%~5.5%。该工程于 2000 年 12 月开工建设,2002 年 5 月竣工,其中坝体混凝土于 2001 年 3 月 3 日开始浇筑,同年 10 月 19 日浇筑完毕,共浇筑坝体混凝土 5.7 万 m³。

在施工过程中,曾多次对沙老河拱坝坝面进行检查,未发现裂缝。但在坝体上部混凝土浇筑完毕约 20 d、坝面保温板开始铺贴时,先后在坝体左拱端及右拱端发现了 4 条贯穿性裂缝^[9,14]。2002 年 3 月,对这 4 条裂缝进行了接缝灌浆。后因水库库区

古树移栽纠纷等问题,导致大坝空库过冬。在经历 2002 年冬季的多次寒潮袭击后,不仅坝上原已灌浆处理的裂缝再次张开,而且在右拱端距离 4 号缝约 20 m 处,又新增了第 5 条裂缝,裂缝缝距为 11~25 m,但河床中部约 110 m 长的坝段未出现类似裂缝,基本保持了完整的坝块,如图 1 所示^[14]。

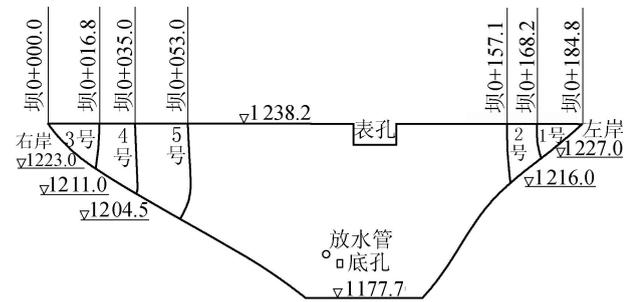


图 1 沙老河拱坝裂缝分布

分析认为,产生裂缝的外因主要有两个:一是在高温季节不分缝、连续浇筑坝体混凝土;二是在大坝空库过冬时,坝面铺贴的泡沫板的保温效果不理想。内因是 MgO 混凝土的膨胀量远低于设计期望值,不能满足补偿温降收缩的要求。利用仿真手段进行的反演分析结果^[15-16]表明,岸坡坝段受坝基岩体约束强烈,两岸靠近拱端部位的最大拉应力超过 2.5 MPa,拱冠接近 2.0 MPa,都超过混凝土的抗拉强度,即坝体出现过大大拉应力是裂缝产生的主要原因。后来对裂缝进行灌浆处理后,大坝安全运行至今,未再出现裂缝。

根据沙老河工程的实践经验和研究结果,在设计贵州省第二座全坝外掺 MgO 混凝土拱坝——三江拱坝时,结合施工计划、拟用材料的特征参数、可能影响坝体温度场的因素等,对大坝进行了仿真分析。结果表明,坝体上部混凝土由于浇筑时温度高,岸坡坡向约束大,需要 200×10^{-6} 的膨胀量才可以完全补偿温降收缩引起的拉应力。也就是说,如果仅靠 MgO 的膨胀来补偿拉应力,坝体上部需要 8%~10% 的 MgO 掺量,这个掺量远超过 5% 的掺量限制^[17]。为此,设计单位针对性地在两岸岸坡各设置了 1 条诱导缝,两缝之间的距离为 107.5 m。三江拱坝坝体混凝土于 2002 年 12 月开始浇筑,2003 年 6 月浇筑完,全过程未采取温控措施(含坝面保温),共浇筑坝体四级配 C₉₀20 混凝土 3.8 万 m³,MgO 掺量为 4.5%~5.0%。三江拱坝在坝体内部埋设各类仪器 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。赵其兴^[18]给出了三江拱坝前 8 年(自坝体混凝土开始浇筑时算起)的混凝土自生体积变形实测过程线,以及前 4 年的坝体实测温度过程线和理论

分析过程线,并结合该坝运行 11 a 拱冠梁的正倒垂位移监测成果分析后指出,三江拱坝混凝土外掺 MgO 后获得了延迟性微膨胀,在宏观上产生了类似于温升效果的变形。三江拱坝的原型监测结果还表明,三江拱坝在 2003 年末经历第一次空库过冬后,坝体温度降至准稳定场,诱导缝按预计准确张开,左、右坝肩诱导缝的最大张开度分别为 4.7 mm 和 5.6 mm。2004 年 3 月,对诱导缝进行了灌浆,然后水库开始蓄水,在当年汛期达到正常蓄水位。自蓄水运行以来,未发现裂缝,说明三江拱坝综合采用外掺 MgO 混凝土和设置诱导缝的设计思路是成功的。此后,贵州省建设的外掺 MgO 混凝土拱坝均参考三江拱坝的成功经验,在坝体设置了诱导缝。表 1 汇总了贵州省采用全坝外掺 MgO 混凝土筑坝技术建成 1 a 以上的工程及其特征数据。

2 应用分析

2.1 拱坝结构对外掺 MgO 混凝土变形的影响

表 1 所列工程除黄花寨工程为大型水库、坝体为高坝外,其余工程均为中等及以下工程,且挡水建筑物皆为混凝土拱坝。拱坝与重力坝的不同之处在于:①拱坝属于超静定结构,不仅坝基受到基岩约束,两侧坝肩同样受到基岩约束,外掺 MgO 混凝土的延迟微膨胀对整个坝体都会产生应力效应;②拱坝的中面在空间是曲面,外掺 MgO 混凝土的延迟微膨胀能产生与温升作用相似的效果,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,三江拱坝、沙老河拱坝等工程超过 10 a 的正倒垂观测结果也支持该观点^[18];③与按分仓方式柱状浇筑的常规混凝土拱坝相比,对于连续施工的外掺 MgO 混凝土拱坝,外掺 MgO 混凝土在施工期所受约束强

烈,变形的自由度相对要小得多。因此,拱坝结构的超静定特性,为外掺 MgO 混凝土在膨胀变化过程中形成预压应力提供了良好的约束环境。

2.2 拱坝坝体外掺 MgO 混凝土的膨胀量

在 8 座拱坝中,除黄花寨和老江底两个工程采用共磨外掺方式将 MgO 掺入混凝土中外,其余工程都是采用机口外掺方式。表 1 中的 8 座拱坝 MgO 掺量为 4.0% ~ 6.0%,它们是参考 GB/T 750—1992《水泥压蒸安定性试验方法》,以水泥砂浆作为压蒸试件(老江底工程除外,该工程以一级配混凝土作为压蒸试件),通过压蒸法确定的。黄花寨拱坝混凝土 MgO 掺量最低,是由于水泥生产厂不愿意生产 MgO 含量大于 6.5% 的成品水泥(实测 MgO 含量为 6% ~ 6.3%),造成混凝土的 MgO 掺量降低所致。

截至 2016 年底,坝体原型监测时间最短的是鱼粮拱坝,约为 2.5 a;最长的是沙老河拱坝,约为 15 a。超长龄期的原型观测结果表明,混凝土浇筑后 1.5 a 或 2 a 为微膨胀变形的增长期,3 ~ 4 a 基本趋于收敛,微膨胀现象在 5 ~ 6 a 后基本消失,不存在无限膨胀;MgO 掺量占胶凝材料总量的 5% ~ 6% 时,在贵州的气候条件下,外掺 MgO 混凝土的最终膨胀量一般小于 200×10^{-6} ,大致在 50×10^{-6} ~ 150×10^{-6} 之间,未完全达到补偿温降收缩所需的设计期望值。朱伯芳院士^[19]指出,若要达到通仓、全年浇筑混凝土,外掺 MgO 混凝土的延迟微膨胀量需要提高到 200×10^{-6} ~ 300×10^{-6} 。因此,按照现行方法确定的 MgO 掺量来制备外掺 MgO 混凝土,其膨胀量很难满足全坝不分横缝时补偿坝体混凝土温降收缩的需要。或者说,如何科学合理地提高水工混凝土的 MgO 安定掺量,需要深入研究。

表 1 贵州省采用全坝外掺 MgO 混凝土筑坝技术建成 1 a 以上的工程及其特征数据

| 工程名称 | 坝型 | 坝高/m | 底厚/m | 顶厚/m | 顶拱弧长/m | 诱导缝数量/条 | 混凝土体积/万 m ³ | MgO 掺量/% | MgO 掺入方式 | 1 a 期混凝土膨胀量/ 10^{-6} | 坝体浇筑起止时间 |
|--------|---------------|-------|-------|------|--------|---------|------------------------|-----------|----------|------------------------|-----------------------|
| 沙老河水库 | 三圆心双曲常态混凝土拱坝 | 61.7 | 12.80 | 4.0 | 184.81 | 0 | 5.50 | 4.0 ~ 5.5 | 机口外掺 | 95 ~ 110 | 2001-03-03—2001-10-19 |
| 三江水库 | 单圆心双曲常态混凝土拱坝 | 71.5 | 10.44 | 4.0 | 137.54 | 2 | 3.80 | 4.5 ~ 5.0 | 机口外掺 | 50 ~ 120 | 2002-12-13—2003-06-17 |
| 落脚河水电站 | 椭圆双曲常态混凝土拱坝 | 81.0 | 15.80 | 4.0 | 196.00 | 4 | 9.60 | 5.0 | 机口外掺 | 40 ~ 100 | 2005-12-24—2006-08-31 |
| 马槽河水电站 | 二次曲线双曲常态混凝土拱坝 | 67.5 | 9.50 | 4.0 | 139.22 | 4 | 3.80 | 6.0 | 机口外掺 | 50 ~ 150 | 2007-03-11—2007-10-31 |
| 黄花寨水电站 | 椭圆双曲碾压混凝土拱坝 | 108.0 | 25.09 | 6.0 | 253.42 | 4 | 29.20 | 3.0 ~ 3.9 | 共磨外掺 | 10 ~ 45 | 2007-04-07—2010-12-30 |
| 老江底水电站 | 椭圆双曲常态混凝土拱坝 | 67.0 | 16.00 | 5.0 | 128.18 | 3 | 6.50 | 5.5 ~ 6.0 | 共磨外掺 | 70 ~ 110 | 2007-12-16—2008-10-20 |
| 河湾水电站 | 抛物线双曲常态混凝土拱坝 | 80.0 | 16.00 | 5.0 | 139.02 | 6 | 9.10 | 5.0 | 机口外掺 | 50 ~ 150 | 2011-05-30—2013-04-10 |
| 鱼粮水库 | 双圆心双曲常态混凝土拱坝 | 50.0 | 11.00 | 3.5 | 134.47 | 2 | 3.55 | 5.0 | 机口外掺 | 115 ~ 190 | 2013-02-05—2014-07-30 |

2.3 拱坝坝体诱导缝的设置与施工

外掺 MgO 混凝土拱坝采用全断面连续浇筑施工工艺,混凝土硬化后即形成拱,这与采取柱状浇筑、后期必须经过接缝灌浆才能形成拱的常态混凝土拱坝的施工工艺不一样,造成坝体的温度场和应力分布也不一样。因此,在设计外掺 MgO 混凝土拱坝时,吸取沙老河拱坝建设经验,事前都进行了仿真分析。结果表明,单纯按照现行方法制备的外掺 MgO 混凝土的微膨胀量,很难解决坝体混凝土的温降收缩问题。因此,从三江拱坝开始,在坝体上部最可能产生裂缝的横截面预先设置了 2~4 条诱导缝,以释放外掺 MgO 混凝土的延迟微膨胀不足以补偿拱坝温度应力时的超标拉应力和引导缝开裂并控制缝的扩展方向。每个工程的诱导缝间距不同,河床坝段的缝距较大,一般为 50~130 m;岸坡坝段缝距较小,一般为 10~40 m。其中,落脚河拱坝在河床部位的无缝坝段长达 128.9 m。工程实践证明,设置诱导缝后,用于生产混凝土的骨料可不事先预冷,坝体混凝土可不埋设冷却水管,能够实现通仓连续(或短间歇)浇筑和全天候施工(表现为连续成拱),还可取消或简化封拱灌浆,从而简化施工工艺,加快施工进度。

诱导缝施工时,为满足外掺 MgO 混凝土拱坝通仓浇筑、连续上升的需要,诱导缝的缝面结构应简单,施工应方便,分缝形式应满足拱坝在未达到稳定温度或准稳定温度时提前蓄水的要求。诱导缝采取

先预制混凝土板、再到仓面拼装成缝的施工方法。在拼装混凝土板时,同时在缝内埋设灌浆系统,如图 2 所示。诱导缝的成缝工艺,宜根据混凝土的入仓方式确定。对于外掺 MgO 常态混凝土的诱导缝,若缝设置在坝体腰身以上,离坝顶较近,且混凝土采用塔机和溜筒入仓方式,施工时宜将每个仓面的混凝土板在混凝土浇筑前按设计要求一次安装完毕;对于外掺 MgO 碾压混凝土的诱导缝,宜优先使用先预埋后碾压的方式,保持预制块与碾压混凝土同步上升。在碾压前,应在预制块的顶面覆盖 3~5 cm 厚的碾压混凝土,以防止平仓、碾压时压坏预制块。诱导缝灌浆应在充分分析观测资料后进行,灌浆工作宜在缝面充分张开且坝体混凝土温度稳定后实施。每次灌浆结束后均需用无压水清洗灌浆盒至回水清亮,并保持进浆管和回浆管畅通,以确保在大坝运行过程中出现缝面二次张开时可重复灌浆。

贵州省在经过沙老河和三江拱坝的实践后,设计理念从最初的单纯依靠外掺 MgO 混凝土的延迟微膨胀来解决拱坝温度裂缝,转变为同时利用外掺 MgO 混凝土的延迟微膨胀和设置诱导缝两项措施来综合解决混凝土拱坝的温度裂缝问题,形成了一系列独特的、行之有效的贵州省外掺 MgO 混凝土拱坝的设计与施工方法。实践证明,当一座混凝土拱坝不能在一个低温季节浇筑完成,并需要在夏季或其他气温较高时段浇筑时,由于年温差变化大,单纯依靠外掺 MgO 混凝土的延迟微膨胀已不能完全解

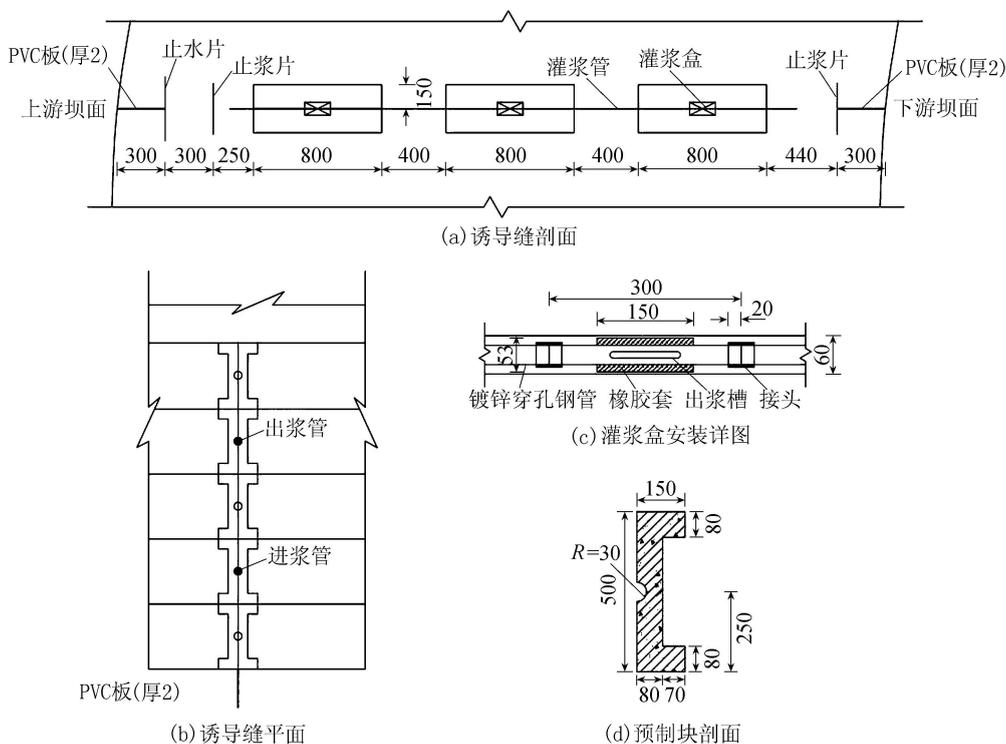


图 2 典型的诱导缝设计(单位:mm)

决坝体混凝土的温降收缩问题,此时在采用外掺 MgO 混凝土的延迟微膨胀补偿温降收缩的基础上,设置少量诱导缝来释放局部(主要是岸坡坝段)过大的拉应力,既能实现混凝土的快速浇筑,又能简化坝体的温控措施。此外,在设置少量诱导缝后,为充分发挥全坝外掺 MgO 混凝土快速筑坝的优越性,对于中等规模以下的拱坝,不宜再分区设计坝体混凝土的 MgO 掺量。

2.4 外掺 MgO 材料在碾压混凝土中的应用

碾压混凝土筑坝技术是现代筑坝新技术之一,它施工速度较快,但需要专门的碾压机械设备。对于薄拱坝或倒悬度大的拱坝来说,对碾压混凝土筑坝技术的适应性稍差。然而,从黄花寨碾压混凝土拱坝的施工实践看,在碾压混凝土中外掺 MgO 材料,不仅可以放宽允许浇筑温度,而且可以通过增大诱导缝间距来改善施工条件,进一步加快施工速度,同时提高混凝土质量,降低工程投资。即在碾压混凝土中外掺 MgO 材料,有利于同时发挥碾压混凝土和外掺 MgO 混凝土筑坝的优越性。与碾压混凝土筑坝技术相比,对于坝体体积小于 20 万 m^3 的中小型拱坝,宜采用全坝外掺 MgO 混凝土筑坝技术。

3 结论

a. 拱坝结构的超静定特性,为外掺 MgO 混凝土在膨胀变化过程中形成预压应力提供了良好的约束环境。

b. 按照现行的水泥砂浆压蒸法或一级配混凝土压蒸法确定的 MgO 掺量制备外掺 MgO 混凝土,将其应用于贵州省的拱坝工程后,坝体混凝土的实测膨胀量多为 $50 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$,未达到设计期望值。如何科学合理地提高水工混凝土的 MgO 安定掺量,需要深入研究。

c. 工程实践证明,在外掺 MgO 混凝土的延迟微膨胀量不能满足设计要求的情况下,设置诱导缝是充分利用外掺 MgO 混凝土筑坝技术优越性的有效措施,它能极大地简化甚至取消过去修筑混凝土拱坝时采用的温控措施,达到简化施工工艺、提高施工速度的目的。

d. 在碾压混凝土中外掺 MgO 材料,有利于同时发挥碾压混凝土和外掺 MgO 混凝土快速、经济筑坝的优越性。

参考文献:

[1] 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. (LI Chengmu, YUAN Mingdao. Review of damming

technology of MgO micro-expanding concrete[J]. Journal of Advances in Science and Technology of Water Resources,2003,23(6):57-63. (in Chinese))

[2] 陈昌礼. 氧化镁混凝土筑坝技术的应用情况分析[J]. 贵州水力发电,2005,17(2):51-53. (CHEN Changli. Analysis on application of technology about building dam using oxidize magnesium concrete [J]. Guizhou Water Power,2005,17(2):51-53. (in Chinese))

[3] 陈昌礼,唐成书. 氧化镁混凝土在东风拱坝基础中的应用及长期观测成果分析[J]. 水力发电学报,2006,25(4):102-107. (CHEN Changli, TANG Chengshu. The application of MgO concrete in Dongfeng Arch Dam foundation and the analysis of long term prototype observation results [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2006,25(4):102-107. (in Chinese))

[4] 徐琼. 外掺氧化镁混凝土筑坝技术探讨[J]. 人民长江,2008,39(8):52-53. (XU Qiong. Discussion on damming technology of MgO concrete[J]. Journal of Yangtze River, 2008,39(8):52-53. (in Chinese))

[5] 李承木,李万军. 外掺 MgO 混凝土快速筑拱坝技术及其应用[J]. 水利水电科技进展,2011,31(6):41-45. (LI Chengmu, LI Wanjun. Application of fast damming technology admixed with MgO expansive concrete in arch dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(6):41-45. (in Chinese))

[6] 陈昌礼,李承木. 氧化镁混凝土的研究与应用[J]. 混凝土,2006(5):45-47. (CHEN Changli, LI Chengmu. Study and application of MgO concrete[J]. Concrete,2006(5):45-47. (in Chinese))

[7] 李承木. 外掺氧化镁混凝土快速筑坝技术综述[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):82-88. (LI Chengmu. Review of quick damming technology of MgO concrete [J]. Journal of Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(5):82-88. (in Chinese))

[8] 陈霞,杨华全,李家正. 外掺氧化镁混凝土的变形特性研究[J]. 人民长江,2011,42(4):88-90,94. (CHEN Xia, YANG Huaquan, LI Jiazheng. Study on deformation characteristics of concrete mixed with MgO[J]. Journal of Yangtze River,2011,42(4):88-90,94. (in Chinese))

[9] 赵其兴. 贵州氧化镁混凝土拱坝设计十年回顾[J]. 水利水电技术,2014,45(2):53-56. (ZHAO Qixing. Ten years review of admixed MgO concrete arch dams in Guizhou Province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2014,45(2):53-56. (in Chinese))

[10] 高培伟,吴胜兴,林萍华,等. 氧化镁在不同养护条件下水化产物的形貌分析[J]. 无机化学学报,2007,23(6):1036-1068. (GAO Peiwei, WU Shengxing, LIN Pinghua, et al. Morphology of MgO hydration products under different curing conditions [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2007, 23(6):1036-1068. (in Chinese))

(下转第94页)

- construction of shanggongshan tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (Supl): 4544-4546. (in Chinese)
- [8] 杨晓迎, 翟建华, 谷世发, 等. TBM 在深埋超长隧洞断层破碎带卡机后脱困施工技术[J]. 水利水电技术, 2010, 41 (9): 68-71. (YANG Xiaoying, ZHAI Jianhua, GU Shifa, et al. Technology for unblocking TBM blocked in fault zone of sper-long and deep-buried tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41 (9): 68-71. (in Chinese))
- [9] WALLIS S, 邓应详. 台湾坪林隧道施工近况[J]. 隧道及地下工程, 1999 (2): 5-15. (WALLIS S, DENG Yingxiang. Recent situation of Pinglin Tunnel in Taiwan [J]. Tunnel and Underground Engineering, 1999 (2): 5-15. (in Chinese))
- [10] WINTER T, BINQUET J, SZINDROI A, et al. From plate tectonics to the design of the Dul Hasti Hydroelectric Project in Kashmir (India) [J]. Engineering Geology, 1994, 36(3/4) : 211-241.
- [11] 王江. 引水隧洞双护盾 TBM 卡机分析及脱困技术[J]. 隧道建设, 2011, 31 (3): 364-368. (WANG Jiang. Analysis on jamming of double-shield TBM in construction of water diversion tunnel and jamming releasing technology [J]. Tunnel Construction, 2011, 31 (3): 364-368. (in Chinese))
- [12] Yellow River Engineering Consulting Co. ,Ltd. . The basic design report of Coca-Codo Sinclair Hydroelectric Project [R]. Zhengzhou: Yellow River Engineering Consulting Co. ,Ltd. ,2011.
- [13] 杨继华, 齐三红, 郭卫新, 等. 厄瓜多尔 CCS 水电站 TBM 法施工引水隧洞工程地质条件及问题初步研究 [J]. 隧道建设, 2014, 34(6) : 513-518. (YANG Jihua, QI Sanhong, GUO Weixin, et al. Case study on engineering geological conditions and problems in construction of headrace tunnel of CCS Hydropower Station in Ecuador by TBM method[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(6) : 513-518. (in Chinese))
- [14] 杨继华, 苗栋, 杨风威, 等. CCS 水电站输水隧洞双护盾 TBM 穿越不良地质段的处理技术 [J]. 资源环境与工程, 2016, 30 (3): 539-542. (YANG Jihua, MIAO Dong, YANG Fengwei, et al. Treatment technology of crossing unfavorable geological tunnel section by double shield TBM at CCS Hydropower Station conveyance tunnel[J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(3) : 539-542. (in Chinese))

(收稿日期: 2016 - 10 - 13 编辑: 熊水斌)

(上接第 88 页)

- [11] 卢小琳, 兰文改, 张洪波, 等. 氧化镁水化产物的微观结构特点表征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38 (5): 555-558. (LU Xiaolin, LAN Wengai, ZHANG Hongbo, et al. Microstructural characteristics of MgO hydration products[J]. Journal of Hehai University(Natural Sciences), 2010, 38(5) : 555-558. (in Chinese))
- [12] 陈胡星, 马先伟. 粉煤灰对氧化镁微膨胀水泥膨胀性能的影响及其机制[J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28 (2): 181-185. (CHEN Huxing, MA Xianwei. Effects of fly ash on expansion of MgO expansive cement and its mechanism [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2010, 28 (2): 181-185. (in Chinese))
- [13] 申献平, 赵其兴. 贵阳市沙老河水库拱坝设计优化[J]. 贵州水力发电, 2004, 18 (2): 57-60. (SHEN Xianping, ZHAO Qixing. The design optimization of Shalaohe arch dam in Guiyang City [J]. Guizhou Water Power, 2004, 18 (2): 57-60. (in Chinese))
- [14] 刘其文, 代富红. 沙老河拱坝裂缝成因探讨及其处理措施[J]. 人民长江, 2011, 42 (5): 59-61, 97. (LIU Qiwen, DAI Fuhong. Discussion on crack formation of Shalaohe Arch Dam and its treatment [J]. Journal of Yangtze River, 2011, 42(5) : 59-61, 97. (in Chinese))
- [15] 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 Guoxin, et al. The analysis of integral stress simulation and admixed MgO effect about Shalaohe arch dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35 (2): 38-40. (in Chinese))
- [16] 张国新, 杨波, 申献平, 等. MgO 微膨胀混凝土拱坝裂缝的非线性模拟[J]. 水力发电学报, 2004, 23 (3): 51-55. (ZHANG Guoxin, YANG Bo, SHEN Xianping, et al. Nonlinear analysis of cracks in gentle volume expansive concrete arch dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(3) : 51-55. (in Chinese))
- [17] 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 Guoxin, 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))
- [18] 赵其兴. 氧化镁混凝土拱坝的宏观变形[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (6): 73-107. (ZHAO Qixing. Macroscopic deformation of MgO concrete arch dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6) : 73-107. (in Chinese))
- [19] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术[J]. 水力发电学报, 2000, 70 (3): 1-13. (ZHU Bofang. On construction of dams by concrete with gentle volume expansion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000, 70(3) : 1-13. (in Chinese))

(收稿日期: 2016 - 12 - 20 编辑: 熊水斌)