

氧化镁混凝土筑坝技术的应用情况分析

陈昌礼

(武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要: 外掺氧化镁微膨胀混凝土筑坝技术于 1989 年 9 月在贵阳市通过了由原能源部组织的技术鉴定, 之后即进入推广应用阶段, 至今已有近 30 个水利水电工程使用该技术。实践证明, 外掺 MgO 混凝土具有良好的延迟微膨胀特性, 能够提高混凝土自生的抗裂能力, 简化坝体混凝土的温控措施, 加快施工进度和节省工程投资。应予以指出的是, MgO 掺量的确定方法还值得进一步研究; 混凝土外掺 MgO 后, 其表面保温和养护工作比一般混凝土更为重要。

关键词: 水工材料; 氧化镁混凝土; 自生体积变形; 筑坝技术; 温控措施

中图分类号: TV431 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-0133(2005)02-0051-03

0 前言

为防止大坝产生贯穿性裂缝, 保障大坝安全运行, 一般在浇筑大坝混凝土时常采用坝内预埋冷却水管、加冰拌合混凝土、柱状浇筑混凝土等手段。这些手段虽然起到了很大的作用, 但施工工艺复杂且不经济; 更严重的是, 如果要实现通仓、厚层、全天候连续浇筑坝体混凝土, 就必须配置庞大的预冷设备, 导致影响施工进度。因此, 如何方便、经济地控制大坝混凝土的裂缝, 一直是广大工程技术人员苦苦思索的难题。

1982 年建成的吉林白山重力拱坝, 虽然有 60% 以上的混凝土是在夏天浇筑的, 但当地冬季气候寒冷温差超过 40°C , 可是在蓄水前进行大坝检查时却未发现基础贯穿性裂缝, 且表面裂缝也很少, 运行多年后也未发生裂缝漏水现象。后来从原型观测资料中发现, 白山拱坝混凝土在降温阶段产生了自生体积膨胀, 抵消了大坝在降温过程中产生的体积收缩, 抑制了大坝的裂缝。随后经大量研究证明, 白山大坝采用的抚顺大坝水泥含有 4.28% ~ 4.38% 氧化镁 (MgO), 这是引起混凝土膨胀的根本原因; 而且这种含有 MgO 的混凝土的早期膨胀较小, 约有 80% 膨胀量发生在 20 ~ 1 000 d 龄期之内, 后期膨胀趋于稳定。白山拱坝发现的这种混凝土膨胀现象, 使广大工程技术人员深受启发。此后, 广大工程技术人员从解决“内因”着手, 利用 MgO 的延迟微膨胀特性来调节混凝土的自生体积变形, 从而达到控制混凝土裂缝的目的, 并对此进行了大量的试验研究工作。

经过多年大量的室内试验研究后, 在 MgO 水泥化学机理、混凝土变形性能、大坝温度应力补偿

和施工工艺控制等方面形成了一套完整的理论体系, 并分别于 1987 年 8 月、1989 年 1 月、1989 年 4 月在浙江石塘水电站的护坦、四川铜街子水电站的明渠右导墙、贵州东风水电站下游的重力围堰进行了外掺 MgO 混凝土的生产性试验, 取得了丰富的试验研究成果, 形成了系统的氧化镁混凝土筑坝技术。该项技术于 1989 年 9 月 23 日在贵阳通过了由原能源部组织的技术鉴定, 其鉴定意见为: 本技术的实施, 具有显著的经济效益和社会效益, 不仅可以简化温控措施、有效防止基础裂缝, 而且可以缩短工期, 是一项加快水利水电建设的有效措施, 具有推广应用价值; 该研究成果具有国际领先水平。此后, 外掺 MgO 混凝土筑坝技术即进入推广应用阶段。

1 氧化镁混凝土筑坝技术的推广应用

MgO 混凝土筑坝技术, 是指在生产大坝混凝土时从调节混凝土自生体积变形的思路出发, 利用 MgO 特有的延迟性膨胀性能, 力求通过调节 MgO 的掺量和质量来控制混凝土膨胀变形的速率、发生时间、稳定时间、膨胀量等, 从而补偿混凝土在降温阶段时产生的体积收缩, 提高混凝土的抗裂能力。该技术抛弃了传统的从控制混凝土的温度着手来预防混凝土裂缝的理念, 使浇筑大体积混凝土的许多有关温度方面的限制大为减少。

MgO 混凝土筑坝技术从通过鉴定以来, 已先后被推广应用于贵州东风水电站等近 30 座大中型

收稿日期: 2004-09-21

作者简介: 陈昌礼 (1966-), 男, 贵州省正安县人, 高级工程师, 武汉大学在职硕士研究生, 从事水工建筑材料研究工作。

水利水电工程, M₈₀混凝土的应用部位已从重力坝基础约束区、碾压混凝土坝基础垫层、大坝基础

垫层发展到导流洞封堵、高压管道外围回填, 直到中型拱坝的全坝段 (见表 1^[1])。实践证明:

表 1 使用 M₈₀混凝土筑坝技术的水利水电工程

工程名称	工程概况			使用 M ₈₀ 混凝土情况			
	建设地点	坝型	坝高 /m	装机容量 / (10 ⁴ kW)	使用时间	使用部位	M ₈₀ 掺量 / %
白山	吉林桦甸	重力拱坝	149.5	150	1975-05~1982	全坝使用	内含 4~28
红石	吉林市	重力坝	51	20	1984~1986	全坝使用	—
石塘	浙江云和	重力坝	38.3	3.3	1987-08	左右岸护坦	4.4
铜街子	四川乐山	重力坝	82	60	1989-01	厂坝连接及导流底孔	4.5
东风	贵州清镇	双曲拱坝	162	51	1990-01~1990-03	基础深槽、导流洞及底孔	3.5
青溪	广东大浦	重力坝	51.5	14.4	1990-07~1991-07	大坝基础约束区	2~5
水口	福建古田	重力坝	101	140	1990-07~1990-12	大坝基础约束区	4.4~4.8
普定	贵州安顺	RCC拱坝	75	7.5	1991-11~1991-12	基础垫层及导流洞	3.2
铜头	四川芦山	双曲拱坝	77	8	1994-06~1995-06	基础垫层左右导流洞	3.0
飞来峡	广东清远	重力坝	52.3	14	1995-11~1997-10	大坝基础约束区	1.75~3.5
龙潭	四川卧龙	闸坝	30	2.4	1996-01~1996-02	压力钢管外围	4.5
黄兰溪	福建福安	闸坝	31.8	3	1996-01	压力钢管外围	3~4
二滩	四川盐源	双曲拱坝	240	330	1996-08和 1998-12	工程探洞拱坝表孔	2.6~3
花滩	四川荣经	RCC拱坝	85	2.4	1996-12和 1999	基础垫层防渗体、导洞	3.5
莲花	黑龙江海林	面板堆石坝	71.8	5.5	1996-12前	导流洞	4.5
红叶I级	四川埋县	闸坝	26	1.7	1997-05	高压钢管外围	5.0
黑土坡	四川埋县	闸坝	20	2.4	1998-10~1999-05	高压钢管外围	5.5
长沙	广东阳春	双曲拱坝	55.5	0.128	1999-01~1999-04	全坝使用	3.5~4.5
沙牌	四川汶川	RCC拱坝	132	3.6	1999-02	基础垫层及垫座	2.6~3.1
李家峡	青海尖扎	双曲拱坝	165	200	1993-06前	基础处理	2.5
石门子	新疆玛纳斯县	RCC拱坝	109	0.64	1999-04~2000-05	全坝使用	2.0
龙首	甘肃张掖	RCC拱坝	80	5.2	2000-3~2001-06	全坝使用	3.0~4.5
冷竹关	四川康定	闸坝	22.5	16.5	1998~2000-05	高压管道外围	5.33
红叶II级	四川理县	闸坝	11.5	9	2000-12~2002-06	压力钢管外围	5.0
沙老河	贵阳北郊	双曲拱坝	61.2	供水工程	2001-03~2001-10	全坝使用	5.0
三江	贵阳北郊	双曲拱坝	71.5	供水工程	2002-12~2003-05	全坝使用	4.5~5.0
坝美	广东乳源	双曲拱坝	53	0.8	2003-02~2003-07	全坝使用	5.5
长潭	广东翁源	双曲拱坝	53	0.5	2004-04~2004-09	全坝使用	5.5~5.75
索风营	贵州修文	RCC重力坝	115.8	60	2003-11~2005-05	大坝基础约束区	4~5

(1) 外掺 M₈₀混凝土具有早期膨胀速率大、后期小的延迟微膨胀特性, 主要的膨胀量 (约 75%) 多发生在 7~90 d 龄期期间, 且其长期自生体积膨胀变形最终都会趋于稳定, 没有无限膨胀的发展趋势。从已采用外掺 M₈₀混凝土筑坝技术的近 30 个水利水电工程看, M₈₀的掺量多为 1.75%~5.75%, 实测的混凝土自生体积膨胀量多在 50×10⁻⁶~200×10⁻⁶之间。例如贵州东风水电站拱坝基础深槽的外掺 M₈₀混凝土 7、28、90 d 及 1、2、5、9 年龄期的实测膨胀量分别为 22.3×10⁻⁶, 36.3×10⁻⁶, 61.8×10⁻⁶, 79.5×10⁻⁶, 79.7×10⁻⁶, 83.8×10⁻⁶和 82.3×10⁻⁶, 分别是 1 年龄期膨胀量的 0.28、0.46、0.78、1.0、1.05 和 1.04 倍; 在 28 d 龄期以前的膨胀速率约为 1.3×10⁻⁶/

d, 在 28 d 至 1 年龄期之间的膨胀速率约为 (0.7~16)×10⁻⁶/月; 在 1 年龄期以后则膨胀变形趋于稳定, 膨胀速率降至 (0.1~1.5)×10⁻⁶/年。这种变化规律与实验室研究结果基本一致^[2]。

由于大体积混凝土温度明显下降的时间一般在混凝土浇筑后的 7~90 d 内, 因此 M₈₀混凝土的延迟微膨胀特性基本上同大体积混凝土散热慢、温降收缩迟缓的特点相匹配。充分利用好这种延迟微膨胀特性, 能够使混凝土产生一定的预压应力, 从而削减甚至抵消它在温降过程中产生的拉应力, 补偿大体积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。

(2) 利用外掺 M₈₀混凝土筑坝技术能够简化混凝土大坝的温控措施、加快施工进度和创造显著

的经济效益。

采用 MgO混凝土筑坝技术的工程, 不仅减少了坝体的分缝分块, 且加大了分层浇筑厚度, 还取消了水管冷却、加冰拌合等常规温控措施, 甚至取消了接缝灌浆。所以, 采用 MgO混凝土筑坝技术再辅以其他适当措施, 可以全部或部分取代传统的混凝土坝的温控措施, 从而简化施工工艺, 实现长块、厚层、通仓、全天候连续浇筑混凝土。这不仅加快施工进度、缩短工期, 同时还能降低工程造价。例如, 贵州东风水电站拱坝基础深槽采用 MgO混凝土回填后, 深槽混凝土由原设计的 36 个浇筑块降为 12 个, 并省去了水管冷却和加冰拌合等常规温控措施, 后来又取消了接缝灌浆, 节省温控费和灌浆费约 25 万元; 另外, 它使深槽混凝土比预计工期提前 45 d 浇完, 使两岸坝肩的开挖得以提前进行, 为在 1991 年初浇筑坝体混凝土奠定了坚实基础, 保证了坝体混凝土的施工工期, 避免了 1 年的工期损失^[3]。东风水电站首台机组现已投产 11 年, 大坝至今运行良好。

2 氧化镁混凝土应用中的问题

从“MgO微膨胀混凝土筑坝技术”15 年的应用实践看, MgO混凝土筑坝技术在简化温控措施、加快施工、节省投资等方面的确发挥了巨大作用, 但同时也带来了以下两方面值得进一步研究和注意的问题。

2.1 关于 MgO 的掺量

使用过 MgO混凝土筑坝技术的工程, 大多认为外掺的 MgO量偏少, 未完全达到设计要求的膨胀量。按照中国水利水电科学研究院朱伯芳院士的研究, 现场全级配 MgO混凝土的最终膨胀量, 仅为室内经过湿筛的混凝土试件的膨胀量的 75% 左右^[4]。目前, 确定 MgO混凝土的 MgO掺量的法规性依据, 仍然是 GB750“水泥安定性试验方法——压蒸法”, 即采用水泥净浆试件压蒸试验法, 以水泥净浆试件的压蒸膨胀率不超过 0.5% 来确定 MgO的掺量, 其值一般为胶凝材料的 4%~5%; 同时要求 MgO的掺量必须确保试件压蒸安定性合格, 以防止过量的 MgO使混凝土过度膨胀而破坏混凝土结构, 危及大坝的安全。

但是, 由于混凝土的水灰比一般为 0.5~0.6 用作压蒸试验的水泥净浆试件的水灰比一般为 0.28 左右, 故混凝土的孔隙率显然比净浆大, 它能够缓解部分膨胀变形, 因此水泥净浆试件的压蒸膨胀情况并不能真实反映混凝土的膨胀情况, 混凝土中 MgO的允许掺量应比水泥净浆多, 所以采用水泥

净浆压蒸安定性试验来确定混凝土中 MgO的允许掺量显得过于苛刻; 而且, 如果把 MgO掺量控制在 5%以内, 则混凝土 1 年的自生体积膨胀变形多在 120×10^{-6} 以内, 难以满足补偿混凝土温降收缩所需的膨胀量, 更影响 MgO混凝土在年平均温差较大的中国北方地区推广应用。

南京化工大学唐明述院士认为, 国家水泥标准中关于 MgO掺量的规定包括了各种混凝土, 特别是包括钢筋混凝土, 它的水泥用量高, 按照水泥用量 5%所掺的 MgO远比水工混凝土多。或者说, 水泥压蒸试验合格则水工混凝土肯定安定, 而水泥压蒸试验不合格时水工混凝土也未必不安定。因此, 对于水工混凝土而言, MgO掺量突破 5%是有可能的。但是如何提高 MgO掺量, 或者如何改进外掺 MgO混凝土安定性的检测手段, 就成为外掺 MgO混凝土推广应用中之一新的研究课题。目前已有少数工程开始尝试使用水泥砂浆试件压蒸试验来确定 MgO混凝土的 MgO掺量。

笔者认为, 应在针对具体工程进行充分的室内试验研究的基础上, 遵循积极慎重的原则, 在一些中小型水利水电工程进行突破 MgO掺量的现场试验, 为最终制定适用于水工混凝土的 MgO掺量技术规范积累工程资料。

2.2 关于混凝土的温控措施

混凝土中掺入适量的 MgO 可以使其产生膨胀性的自生体积变形, 利用这种膨胀变形可以全部或部分抵消混凝土的温降收缩、简化温控措施, 这已是不争的事实。但是, 如果认为掺了 MgO就可以完全取消其他温控措施的观点也是不全面的。只有结合具体工程, 通过温度应力补偿分析和室内试验论证混凝土的自生体积膨胀量可以抵消温降收缩量时, 才可省去预冷骨料和冷却水管; 至于混凝土的表面保温和养护, 则任何时候都不能省略, 反而外掺 MgO混凝土的表面保温和养护比一般混凝土更为重要。另外, 那些花钱不多又不影响施工进度简单温控措施, 仍应尽量采用, 因为对于大体积混凝土而言, 温差毕竟是越小越好。

参考文献:

- [1] 李承木, 袁明道. MgO微膨胀混凝土筑坝技术应用综述 [J]. 水利水电科技进展, 2004 (6): 1-13.
- [2] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术 [J]. 水力发电学报, 2000 (3): 1-12.
- [3] 陈昌礼, 高家训. 氧化镁混凝土在东风水电站坝基深槽中的应用 [J]. 混凝土坝技术, 1992 (2): 28-32.
- [4] 陈昌礼, 郑治, 等. 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.