

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.01.020

高碾压混凝土重力坝温控防裂技术研究进展

冯树荣^{1 2}

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 从材料特性、温控措施、结构设计等方面介绍碾压混凝土重力坝温控防裂的特点, 阐述碾压混凝土重力坝温度应力的研究进展及主要成果, 分析相应温控标准及温控防裂措施, 提出今后的研究方向。

关键词: 高碾压混凝土重力坝; 温度应力; 温控标准; 温控防裂措施; 研究进展

中图分类号: TV698.2+31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2009)01-0077-04

Study on temperature control and crack prevention technology of a high RCC gravity dam//FENG Shu-rong^{1 2} (1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Mid-South Design and Research Institute, CHECC, Changsha 410014, China)

Abstract: The temperature control and crack prevention characteristics of a roller compacted concrete (RCC) gravity dam are introduced in terms of material properties, temperature control measures and structural design. The progress of research on temperature stress of the RCC gravity dam is described. The temperature control standard and temperature control measures for prevention of cracking of the RCC gravity dam are analyzed, and the future research directions are proposed.

Key words: high roller compacted concrete (RCC) gravity dam; temperature stress; temperature control standard; temperature control measures for crack prevention; research progress

1979 年我国开始碾压混凝土筑坝技术的研究工作, 经过 20 多年的实践, 积累了宝贵的经验。随着 200 m 级龙滩高碾压混凝土重力坝的研究和建设, 对碾压混凝土坝的温控防裂特点有了深入的认识。本文主要介绍我国在高碾压混凝土重力坝温控防裂方面的研究成果, 对其温度应力特点、计算分析方法、温控标准、温控防裂措施等进行讨论。

1 温控防裂的特点

大坝产生裂缝的影响因素很多, 但大多数是由温度应力引起。因此, 防裂的主要手段是通过温度控制和结构措施来控制温度应力。高碾压混凝土重力坝温控防裂技术有其自身的特点。

1.1 材料特性

1.1.1 绝热温升

碾压混凝土的水泥用量相对较小, 粉煤灰掺量较大, 由于粉煤灰延迟发热的特点, 因此水化热温升速度慢, 绝热温升相对较低, 对温度控制有利。

根据我国部分工程碾压混凝土配合比室内试验结果, 统计得出碾压混凝土某龄期 t 的绝热温升 T_{rt}

与最终绝热温升 T_0 之间的关系为^[1]

$$T_{rt} = T_0(1 - e^{-0.177t}) \quad (1)$$

资料表明, 多数工程碾压混凝土的最终绝热温升在 11 ~ 20 ℃ 之间, 而常态混凝土的最终绝热温升在 20 ~ 27 ℃ 之间。碾压混凝土坝实测温升有如下特点: ①最高温升略低于室内试验值; ②温升速率与碾压混凝土的入仓温度密切相关, 入仓温度高则达到最高温升的时间短, 相反则较长; ③碾压混凝土的温升速率和最高温升明显低于常态混凝土。

1.1.2 极限拉伸

大多数工程碾压混凝土 90 d 龄期的极限拉伸值在 $70 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$ 之间, 低于相同原材料的常态混凝土, 钻孔取芯实测极限拉伸值远低于室内试验值, 层间结合强度低, 仅为混凝土本体的 0.3 ~ 0.8 倍^[2]。碾压混凝土的极限拉伸值随着龄期和胶凝材料的增加而增加, 根据我国部分工程的试验资料统计, 极限拉伸随龄期增长率为^[1]

$$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{28}} = 54.762t^{0.184} \quad (r = 0.69, n = 17) \quad (2)$$

式中: ε_t 、 ε_{28} 分别为碾压混凝土 t 龄期和 28 d 龄期的

极限拉伸值 ϵ_r 为相关系数 ϵ_n 为样本数。

1.1.3 徐变

碾压混凝土的徐变一般比常态混凝土小,不利于温控防裂,其徐变的特点是:①室内混凝土试验的徐变值比常态混凝土徐变值小,实际坝体的徐变值比常态混凝土徐变值略小。②在 90d 龄期以前施加荷载,碾压混凝土的徐变大于常态混凝土的徐变。施加荷载的龄期越早,徐变越大,在龄期超过 90d 后施加荷载,则反之。

1.2 温控措施

由于碾压混凝土水胶比小,难以大量加冰拌和,同时采用薄层铺筑碾压、连续上升的施工方式,低温入仓时冷量损失大,难以实现常态混凝土那样的低温浇筑,采用加冰拌和、预冷骨料等措施效果差,故多采用遮阳隔热、仓面喷雾、盖保温被、快速覆盖等措施,在高温季节浇筑的部位采用了冷却水管。

1.3 结构设计

1.3.1 坝体材料分区

高碾压混凝土重力坝的材料分区根据受力状态、构造要求、施工环境条件等确定,力求简化。通常上游面采用二级配碾压混凝土,厚度为水头的 $1/15 \sim 1/20$,内部为三级配碾压混凝土,上、下游面为变态混凝土。坝体内部根据坝高按高程或部位分别采用不同强度等级的碾压混凝土。

1.3.2 坝体分缝

对于高碾压混凝土重力坝,初步研究成果表明:不设纵缝时,最大温度拉应力沿水流方向发生在靠近基岩处,比设置纵缝时的拉应力大,随坝高增加而增加,但不会产生质的变化;当横缝间距加大时,沿坝轴线方向的应力增大,横缝间距为 100 m 时的应力约为横缝间距为 20 m 时的 2 倍^[3]。横缝间距变化较大,国内外统计资料表明在 15 ~ 80 m 之间。

2 温度应力研究

2.1 国内外研究概况

碾压混凝土坝的温度场和温度应力分析方法包括:以美国为代表的有限元时间过程方法和以日本为代表的约束系数矩阵法;英国和法国一般采用 ANSYS, ADINAT 和 ABACUS 等专利程序。当 Tatro 等在美国混凝土学会会刊(ACI)上发表了“Thermal consideration for roller compacted concrete”^[4]一文后,碾压混凝土坝的温度应力问题才引起人们的重视。国内相关科研单位和学校也进行了深入研究,取得了具有重要理论意义和实用价值的成果。

我国在碾压混凝土结构的温度应力数值分析和理论研究方面一直被认为处于世界前列。朱伯芳等^[5-6]为减少碾压混凝土坝的计算量,提出了以误差

控制为特点的仿真并层算法、分区异步长算法和并层坝块接缝单元,推导了考虑水管冷却效果的等效热传导方程。丁宝瑛等^[7]在温度应力计算中考虑材料参数变化的影响,深入研究了碾压混凝土的温度徐变应力状况。冯明珩等^[8]基于不稳定温度场的显式有限元解法和徐变应力的初应变法,对碾压混凝土重力坝进行了全过程的温度、应力仿真计算。陈尧隆等^[9]采用三维有限元浮动网格法对碾压混凝土坝温度场进行了全程仿真分析。牛景太等^[10]在建立有限元等效模型的基础上提出了求解层间应力的方法,模拟了坝体层面的连续、滑移以及开裂等工作状态。朱岳明等^[11]在非均匀单元方法和虚拟层合单元法的基础上提出的非均质层合单元法大幅度降低了计算规模,提高了解题的效率,在理论上实现了碾压混凝土坝成层非均质单元的数学处理。秦力^[12]将混凝土的瞬态热传导和徐变过程与内时损伤本构模型相结合,给出碾压混凝土考虑非稳定蠕变及温度影响下损伤破坏的非线性有限元计算格式。刘海成等^[13]建立了考虑温度影响的大体积混凝土结构应力场分析的有限元表达式。刘宁等^[14]将随机有限元法引入重力坝随机徐变应力的计算,综合考虑了坝体混凝土温度场以及混凝土力学参数随机性对徐变应力场的影响。陈里红等^[15]在温度应力仿真程序中考虑了混凝土的软化性能。张子明等^[16]提出了考虑水化热特性的混凝土绝热温升理论(等效时间理论)和热传导方程及其解法。

近年来,大坝温度和应力仿真计算领域最大的进步体现在并层算法、分区异步长、等效水管算法及高效大规模方程求解等几个方面。

2.2 主要研究成果

a. 高碾压混凝土重力坝坝体自然降温达到稳定温度需要几十年甚至上百年的时间,坝体在很长一段时间内具有较高的温度,更易因内外温差而出现裂缝。因此,在后期发生降温或环境条件改变时,早期未出现裂缝的坝可能在运行多年后产生危害性裂缝。

b. 在碾压混凝土重力坝的基岩面上,一般先浇 1 ~ 3 m 厚的常态混凝土垫层,部分工程停浇 30 ~ 60 d 后,进行固结灌浆,形成薄层长间歇,易出现裂缝。

c. 由于降温缓慢,碾压混凝土重力坝最大基础温差出现在坝建成多年后,此时一般有水压自重作用,混凝土强度也相应提高,徐变充分发挥作用,基础温差引起的应力与坝体荷载引起的应力同时存在,使拉应力有所减小,对顺河向应力不起控制作用,因基础温差过大而出现纵缝的情况较少;由于坝内高温持续时间长,坝表面遇低温季节、寒潮时内外温差大,极易出现表面裂缝,故坝体控制的温差是内外温差;同时由于施工仓面大,上下层混凝土的约束强,当间歇

时间较长时 ,上下层温差引起的应力也较大。

d. 由于碾压混凝土坝高温持续时间长 ,首次蓄水或水温较低时会引起较大的内外温差 ,在坝上游面强约束区受内外温差和基础温差双重作用 ,极易出现劈头裂缝 ,必须采取措施 ,缩小横缝间距 ,加强表面保温 ,加大横缝止水至上游面的距离。

e. 碾压混凝土层间抗拉强度相对较低 ,遇低温水冷击或温度骤降时易引起水平裂缝。上游面的裂缝因压力水进入 ,易引起水力劈裂使裂缝向更深部位发展。

f. 防渗层混凝土水泥用量和绝热温升相对较高 ,且热力学参数与内部碾压混凝土参数有一定差距 ,使防渗体混凝土有更大的拉应力 ,易出现裂缝。要注意在满足防渗要求下 ,控制防渗体厚度和水泥用量。

g. 碾压混凝土重力坝中设置的孔洞 ,因应力集中易导致拉裂 ,特别在寒潮或过水温度骤降、出现超冷现象时 ,容易出现表面裂缝 ,如果存在缝内裂隙水的劈裂作用 ,往往会使其扩展为大裂缝。

3 温控标准研究

3.1 现有温控标准

3.1.1 基础温差

《混凝土重力坝设计规范》DL 5108—1999^[17]建议的基础温差标准见表 1。国内外一些工程提出的基础允许温差控制值见表 2。

表 1 DL5108—1999 规定的碾压混凝土基础温差

距基础面 高度 h	基础温差/℃		
	$L < 30\text{ m}$	$L = 30 \sim 70\text{ m}$	$L > 70\text{ m}$
$(0 \sim 0.2)L$	18 ~ 15.5	14.5 ~ 12	12 ~ 10
$(0.2 \sim 0.4)L$	19 ~ 17	16.5 ~ 14.5	14.5 ~ 12

注 : L 为浇筑块长边边长。

表 2 部分碾压混凝土工程控制基础温差

工程名称	坝高/ m	基础温差/℃	
		$h=(0 \sim 0.2)L$	$h=(0.2 \sim 0.4)L$
坑 口	56.3	12.0	14.0
沙溪口		16.7	19.7
铜街子	85.0	16.0	19.0
岩 滩	110.0	14.0	16.0
大广坝	57.0	15.0	17.0
江 垭	131.0	13.0	15.0
棉花滩	113.0	16.0	19.0
大朝山	111.0	16.0	19.0
桃林口	74.5	16.0	19.0
高坝洲	57.0	14.0	16.0
龙 滩	216.5	16.0	19.0
三峡围堰	146.0	12.0	15.0
岛地川(日)		25.0	25.0
玉川(日)		20.0	20.0
柳溪(美)		16.7	16.7

3.1.2 内外温差

常态混凝土的内外温差一般控制在 20 ~ 25 ℃。

由于碾压混凝土的抗拉强度比常态混凝土的抗拉强度增长慢 ,在同样温差下 ,出现裂缝的机会大 ,故国内碾压混凝土重力坝的内外温差控制在 16 ~ 22 ℃ ,同时控制最高温度不超过允许值。

3.1.3 上下温差

当碾压混凝土出现长间歇 ,上下层允许温差一般取 10 ~ 12 ℃ ,浇筑块侧面长期暴露时采用较小值。

3.2 温控标准的研究

我国早期已建的 100 m 级及以下的部分碾压混凝土重力坝工程在温控标准上参照了现行规范 ,总体来看规定比较严格。对于高碾压混凝土重力坝 ,结合龙滩工程基础温差标准研究 ,采用约束系数矩阵法和有限单元法进行了分析 ,计算得到的基础允许温差比现行规范规定的基础温差提高了 2 ~ 3 ℃。我国早期已建工程的基础温差控制比较严格 ,与当时使用的胶凝材料用量中等偏低水平有关。

基础温差控制标准的研究和确定 ,要依据工程的重要性以及考虑施工特点和计算情况 ,针对不同的部位、施工时段与材料情况分别控制。上下层温差与施工条件有关 ,如浇筑层厚、停歇时间、气候条件、降温措施等 ,目前一般工程不具体规定 ,而是根据新老混凝土的约束条件 ,限定下层老混凝土停歇时间不超过 28 d ,否则按基础温差控制 ,但标准适当放宽。一般工程也不规定内外温差 ,而是根据气温下降幅度和混凝土龄期 ,通过温度应力计算分析来确定是否需要保温。

4 温控防裂措施研究

对于中小型碾压混凝土重力坝 ,可充分利用低温季节浇筑。但对于大体积高碾压混凝土重力坝 ,尤其是高温季节连续施工的大坝 ,必须采取温控防裂措施。主要研究成果 :

a. 根据温度应力计算及温控研究确定合适的横缝间距是防裂措施之一。考虑施工的可能和抗拉的要求 ,横缝间距选择在 15 ~ 25 m 左右 ,不分纵缝。对于高碾压混凝土重力坝 ,由于基础约束范围大 ,如孔洞位于基础强约束区 ,容易出现裂缝 ,在满足功能要求的前提下 ,应尽量抬高孔洞设置高程 ,有利于防止裂缝的产生。

b. 通过优化配合比 ,在满足功能要求的条件下 ,高掺粉煤灰 ,在控制水泥用量、降低体积收缩和水化热温升的同时 ,提高混凝土的极限拉伸值。工程实践表明 ,改进施工工艺、提高施工质量、适当掺用外加剂、控制砂石级配、降低热强比、提高碾压混凝土抗裂能力是防止裂缝产生的经济而有效的措施。碾压混凝土重力坝采用 MgO 微膨胀混凝土技

术也可以降低约束区、高温季节浇筑区及坝上游防渗层的拉应力,有利于防裂。

c. 从降低混凝土出机口温度、减少仓面和运输途中的温度回升两方面来控制浇筑温度。夏季施工时采用加冰拌和、预冷骨料、遮阳隔热、仓面喷雾以及加快浇筑速度和利用早晚间作业等措施降低碾压混凝土坝浇筑温度。与常态混凝土坝相比,降低碾压混凝土坝浇筑温度相对较困难,因此仓面喷雾、盖保温被、快速覆盖等措施对降低高温季节碾压混凝土坝的浇筑温度是非常必要的。斜层碾压主要是为了解决浇筑能力的问题,由于斜层碾压缩短了覆盖时间,从而可以减少热量倒灌,起到温控的作用。计算表明,如果将斜层碾压的覆盖时间从4h缩短到2h,那么与仓面不采取保温措施相比可使最高温度降低 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。

d. 碾压混凝土坝施工方案和进度的安排对温控防裂有一定的影响。选择低温季节筑浇基础混凝土,并尽可能在一个枯水季节脱离基础强约束区^[18]。对基础约束区混凝土、孔洞周边混凝土等重要结构部位,混凝土施工应连续均匀上升,尽量避免出现薄层长间歇,其余部位应做到短间歇连续均匀上升。对高温季节施工的部位,应利用早、晚、夜间进行浇筑。

e. 仓面保温养护和表面保护是防止裂缝产生的关键措施,特别要加强早期养护防止产生早期表面裂缝。混凝土的降温和保护是温度控制中不可偏废的2个方面。忽视混凝土的保温,或使混凝土表面或内部温度降得过低,都会引起表面或深层裂缝,甚至产生贯穿性裂缝。养护的原则是保护混凝土表面的湿润状态,防止干裂。在高温季节,可采用表面流水冷却的方法进行散热;当日平均气温低于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或遇气温骤降使混凝土受冷击时,坝面及仓面必须覆盖保温材料,并适当延长拆模时间,所有孔、洞等入口应设帘以防混凝土受到冷击。夏季浇筑混凝土时,利用仓面保温被可以使最高温度降低 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 1.5 cm 厚聚乙烯保温被的保温效果相当于 $0.5\sim 0.6\text{ m}$ 厚混凝土的保温效果^[2]。混凝土碾压完毕,即用保温被保温,等混凝土的温度高于环境温度后,除去保温被,利用表面散热。

f. 近几年随着在高温季节进行大体积碾压混凝土的施工,冷却水管特别是塑料冷却水管得到了成功应用。对高温期施工的碾压混凝土,孔、洞周边的混凝土以及需要进行横缝接缝灌浆的部位等应埋设冷却水管进行通水冷却。初期冷却应在混凝土碾压完成后进行通水,在低温季节来临前,将坝体温度降至设计要求的温度。对有灌浆要求的部位,需进

行后期通水冷却。

5 结 语

高碾压混凝土重力坝的温控防裂与常态混凝土坝相比,既有简化的方面,也有复杂的一面,碾压混凝土重力坝在国内应用仅20多年,经验累积还不多,温控防裂问题还需进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 张严明,王圣培,潘罗生.中国碾压混凝土坝20年:从坑口坝到龙滩坝的跨越[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [2] 张国新.碾压混凝土坝的温度控制[J].水利水电技术,2007,38(6):41-46.
- [3] 孙恭尧,王三一,冯树荣.高碾压混凝土重力坝[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [4] TATRO S B, SCHRADER E K. Thermal consideration for roller compacted concrete[J]. Journal of The American Concrete Institute(ACI),1985,82(2):119-128.
- [5] 朱伯芳,许平.混凝土坝仿真计算的并层算法和分区异步长算法[J].水力发电,1996,22(1):30-43.
- [6] 朱伯芳.考虑外界温度影响的水管冷却等效热传导方程[J].水利学报,2003(3):49-54.
- [7] 丁宝瑛,黄淑萍,秦明豪,等.碾压混凝土坝的温度应力[J].水利水电技术,1987(10):15-19.
- [8] 冯明琿,武永存.碾压混凝土坝温度应力仿真计算[J].大连理工大学学报,2000,40(2):228-232.
- [9] 陈尧隆,何劲.用三维有限元浮动网格法进行碾压混凝土重力坝施工期温度场和温度应力仿真分析[J].水利学报,1998(1):1-5.
- [10] 牛景太,侍克斌,王远辉.碾压混凝土重力坝层间应力研究[J].水力发电,2006,32(1):70-71,79.
- [11] 朱岳明,秦宾,张建斌,等.基于生长单元网格浮动的碾压混凝土坝温度场分析[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):28-32.
- [12] 秦力一.考虑非稳定蠕变及温度效应的碾压混凝土有限元分析[J].计算力学学报,1997,14(3):304-309.
- [13] 刘海成,吴智敏,宋玉普.碾压混凝土浇筑层温度场计算模型研究[J].计算力学学报,2005,22(6):651-657.
- [14] 刘宁,刘光廷.大体积混凝土结构随机温度徐变应力计算方法研究[J].力学学报,1997,29(2):189-202.
- [15] 陈里红,傅作新.大体积混凝土结构施工期软化开裂分析[J].水利学报,1993(3):70-74.
- [16] 张子明,冯树荣,石青春.基于等效时间的混凝土绝热温升[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(9):573-577.
- [17] DL5108—1999,混凝土重力坝设计规范[S].
- [18] 蔡为武.碾压混凝土温控防裂探讨[J].水利水电科技进展,2000,20(2):28-30.

(收稿日期:2008-03-01 编辑:方宇彤)