

# 陶岔渠首枢纽工程混凝土防裂技术研究与应用

奚建猛<sup>1</sup>, 孙业文<sup>2</sup>, 龚志明<sup>1</sup>

(1. 盐城市河海工程建设监理中心, 盐城 224002; 2. 淮河水利委员会治淮工程建设管理局, 蚌埠 233001)

**摘要:** 为保证工程质量,对陶岔渠首枢纽工程开展了混凝土施工防裂专题研究。在室内实验和现场原型试验反演分析获取参数的基础上,通过多工况混凝土温度和应力等的仿真计算,结合现场实际情况,分阶段分坝段提出科学合理的混凝土防裂方案,工程严格按照混凝土防裂方案予以实施。主体工程大坝已于2012年9月封顶,截止目前主体结构混凝土未出现深层和贯穿性结构裂缝,防裂效果良好。

**关键词:** 混凝土防裂; 仿真温度; 应力位置; 陶岔渠首

中图分类号: TV671

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0207-04

## Research and application of concrete anti-cracking technique in Taocha canal headwork's pivotal project

XI Jianmeng<sup>1</sup>, SUN Yewen<sup>2</sup>, GONG Zhiming<sup>1</sup>

(1. Yancheng Engineering Construction Supervision Center, Yancheng 224002, China;

2. ZhiHuai Engineering Construction Administration of Huaihe River Water Resources Commission, BengBu 233001, China)

**Abstract:** In order to ensure pivotal project quality of Taocha canal headwork, the paper carried out a monographic study on concrete anti-cracking during the process of construction. On the basis of numerous indoors and construction site experiments, through the emulation calculations to different concrete temperatures and stresses at different construction sites, according to the actual situation of the worksite, it put forward a reasonable and scientific scheme of concrete anti-cracking for different dams at different construction periods. The project was strictly carried out according to the concrete anti-cracking scheme. The principal part of the dam was built up in September, 2012. Up to now, there is neither deep-fractured nor penetrable crack in concrete of the principal structure part. The anti-cracking effect is good.

**Key words:** anti-cracking of concrete; simulation temperature; stress position; Taocha canal headwork

陶岔渠首枢纽工程是南水北调中线一期工程输水总干渠的引水渠首,也是丹江口水库的副坝。主体工程挡水建筑物位于原渠首闸下游约70 m,由左、右岸混凝土重力坝、引水闸和电站等组成;挡水建筑物上游为长约4 km的引渠,与丹江口水库相连,挡水建筑物下游与南水北调中线总干渠相连。

混凝土重力坝坝顶高程176.6 m,最大坝高60 m,轴线长265 m,共分15个坝段。其中1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>坝段为左岸非溢流坝段;6<sup>#</sup>坝段为安装场坝段;7<sup>#</sup>~8<sup>#</sup>坝段为电站厂房坝段;9<sup>#</sup>~10<sup>#</sup>坝段为引水闸坝段;11<sup>#</sup>~15<sup>#</sup>坝段为右岸非溢流坝段。左、右岸非溢流坝以横缝为界分成各自独立的结构,其基本剖面均为三角形,上游面直立,下游面坡比1:0.7,坝顶宽6 m。

挡水建筑物上游立视图图1。

## 1 混凝土防裂研究

大体积混凝土的开裂,从根本上说主要是由于混凝土结构与结构之间或结构的不同部位之间的温度应力超过混凝土的抗裂能力而产生的。由于约束的存在,混凝土中水泥水化热温升或外界环境温度变化引起结构的温度变形受到约束而产生温度应力,当此温度应力超过混凝土的抗裂能力时便产生了裂缝;混凝土的干缩变形与温度应力的叠加助长了裂缝的形成和发展。

因施工现场影响混凝土温度和应力的因素很多,且有些因素还会随机出现,事先很难进行准确的预

收稿日期:2014-04-03; 修回日期:2014-05-28

基金项目:南水北调中线陶岔渠首枢纽工程科研项目

作者简介:奚建猛(1967-),男,江苏盐城人,高级工程师,硕士,主要从事工程建设管理工作。

通讯作者:孙业文(1966-),男,安徽庐江人,硕士,教授级高级工程师,主要从事工程建设管理工作。

测,比如施工时现场的气温和风速等气象条件,实际施工混凝土热学和力学特性的真实情况及其现场变化,甚至有时相差还较大,因此需要对现场各个典型施工时期的典型施工对象的跟踪观测,及时进行现场

施工防裂方法的动态反馈研究,确保后续浇筑混凝土在施工前及时得到更加完善和可靠的施工防裂方法,或及时弄清楚裂缝出现的原因,避免同类裂缝的再出现或将同类裂缝再出现的可能性降低到最小。

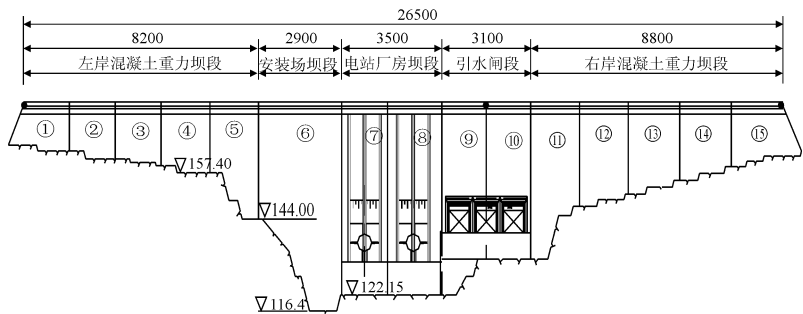


图1 挡水建筑物上游立视图(长度单位:cm,高程单位:m)

1.1 混凝土仿真计算方法

本工程采用能够对水管冷却混凝土温度和应力高精度仿真计算的“水管离散单元法”进行施工防裂方法研究,提出实际施工阶段的科学、可靠的混凝土防裂方法。混凝土是分层浇筑的,且混凝土的温度计算参数和变形与应力计算参数是随龄期变化的,计算时充分考虑这些因素的影响。

在温度场仿真计算时,先进行坝段坝基地温场的仿真计算分析。基岩的底面及4个侧面按绝热边界处理,与大气接触的基岩顶面按第三类边界条件处理,考虑为粗糙表面;坝体上下游面及顶面(包括仓面)按第三类边界条件处理,考虑为光滑表面;两个横侧面按施工顺序分别考虑为第三类散热面和绝热面。

地温资料:因缺少沿深度方向的地温资料,地基中初始温度的确定方法为:取坝体地基初始温度为常数,再根据坝址的多年气温的实际变化情况,对地基进行非稳定温度场的仿真计算。所得的坝基温度场即假定为仿真计算时坝基岩体中的初始温度场。

在应力场仿真计算时,所取基岩底面三向全约束,四个侧面按法向约束边界处理,坝体所有临空面均为自由边界。在应力分析中,应力以拉为正,以压为负。

在仿真计算中,考虑的荷载除了混凝土温度荷载外,还有混凝土自重、自生体积变形和徐变所引起的荷载等;还要考虑混凝土龄期对混凝土的绝热温升、弹性模量和徐变度的影响。

1.2 仿真计算模型及特征点布置

本文以5#典型坝段为例进行仿真计算,三维有限元分析模型的计算域为:基岩在坝踵上游和坝趾下游各取35 m,左右岸各取30 m,建基面以下取50 m,坝体混凝土取5#坝段整体。

采用有限元精细网格剖分,考虑坝体内温度变化的梯度情况,在靠近坝体上游面设置相对较薄的单元。仿真计算整体网格共划分9 115个单元,10 174个节点;添加水管后,整体网格共划分29 318个单元,33 474个节点。特征点共选取了9个,本文重点介绍1、6、8特征点情况。5#岸坡坝段特征点布置见图2。

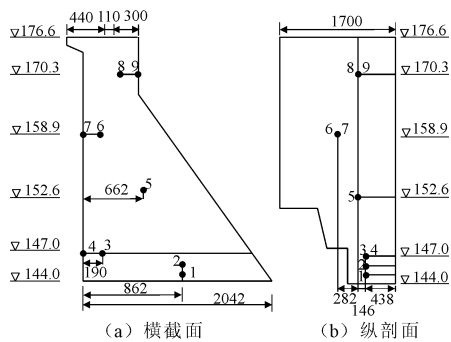


图2 5#岸坡坝段特征点布置

1.3 仿真计算工况

(1)工况1:不采取任何温控措施。钢模板支护,施工仓面裸露;每个浇筑层浇筑后7 d内考虑日平均气温 $\pm 7.5^{\circ}\text{C}$ 的昼夜温差,风速取当地多年平均风速2.0 m/s;考虑到混凝土在输送过程中温度会有所升高,浇筑温度取为浇筑时的日均气温加 $3^{\circ}\text{C}$ ,同时要求不低于 $5.0^{\circ}\text{C}$ 和不高于 $28.0^{\circ}\text{C}$ 。基础强约束区混凝土浇筑层厚1.0~2.0 m,上下浇筑层间歇期为7 d;基础弱约束区和非基础约束区混凝土浇筑层厚3.0 m,拆模时间为2 d,上下浇筑层间歇期为10 d。混凝土浇筑至高程146.0 m时间歇20 d。

(2)工况2:在工况1的基础上采取保温措施。在混凝土仓面覆盖3.0 cm厚的大坝保温被直到上层混凝土浇筑,计算时表面热交换系数取16.2

$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ;在混凝土侧面钢模板外贴 2.5 cm 厚的聚乙烯苯板(拆模前)和覆盖 3.0 cm 的大坝保温被(拆模后),保温 8 d,计算时表面热交换系数取  $16.2 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。其他同工况 1。

(3)工况 3:在工况 2 的基础上进行水管冷却和冬季表面保温。冷却水管采用内径 28 mm、外径 32 mm 的 HDPE 管,水管层距  $\times$  间距:高程 144.0 ~ 146.0 m 垫层混凝土和高程 146.0 ~ 148.0 m 强约束区混凝土采用  $1.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ ;高程 148.0 m 以上弱约束区和非约束区混凝土采用  $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 。水管沿上下游方向布置,通水时间遵循浇筑开始即通水原则,高程 165.8 m 以下混凝土通水持续时间

12 d,高程 165.8 m 以上混凝土通水持续时间 10 d。冷却水水温约  $10.0^\circ\text{C}$ ,流速  $1.0 \text{ m/s}$ ,流量  $2.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,5 d 后流量减半,维持水温  $10.0^\circ\text{C}$ ,流速  $0.5 \text{ m/s}$ ,流量  $1.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 。前 5 d 每半天改变一次水流方向,此后每天改变一次水流方向。在混凝土浇筑结束后第一个冬季在坝体表面覆盖 5.0 cm 厚的大坝保温被,一直覆盖至第二年 3 月份。其他同工况 2。

1.4 各工况特征点温度和应力历时曲线

各工况特征点温度和应力历时曲线见图 3 ~ 14。

1.5 仿真计算分析主要结论

(1)在 5 月份浇筑的混凝土,采用常规施工方法和不采取任何温控措施时,5<sup>#</sup>岸坡坝段温度场的

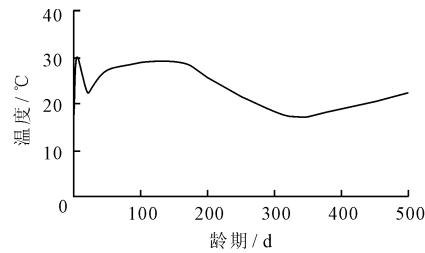


图 3 (工况 1)特征点 1 的温度历时曲线

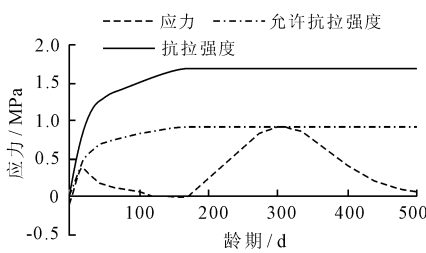


图 4 (工况 1)特征点 1 的应力历时曲线

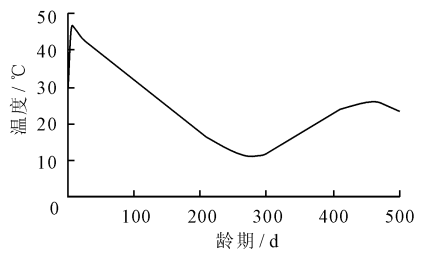


图 5 (工况 1)特征点 6 的温度历时曲线

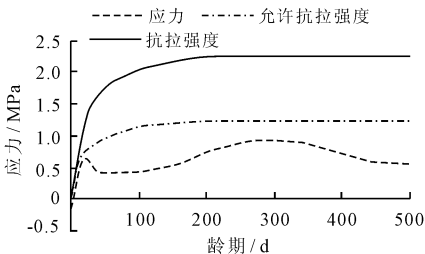


图 6 (工况 1)特征点 6 的应力历时曲线

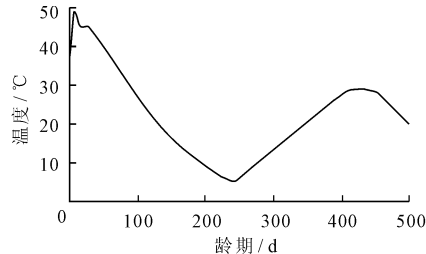


图 7 (工况 1)特征点 8 的温度历时曲线

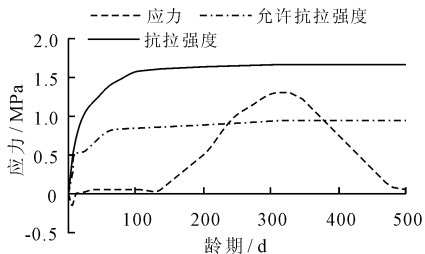


图 8 (工况 1)特征点 8 的应力历时曲线

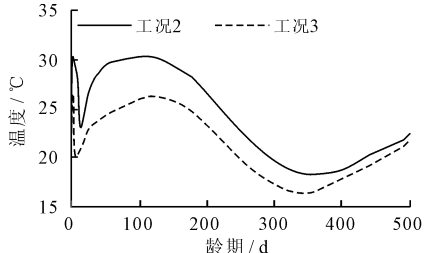


图 9 (工况 2 和工况 3)特征点 1 的温度历时曲线

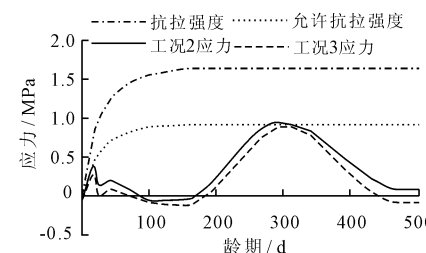


图 10 (工况 2 和工况 3)特征点 1 的应力历时曲线

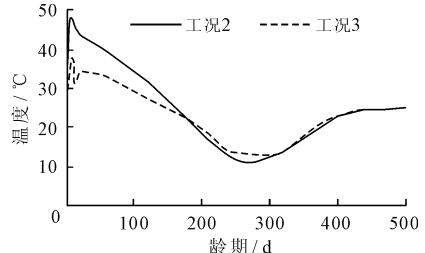


图 11 (工况 2 和工况 3)特征点 6 的温度历时曲线

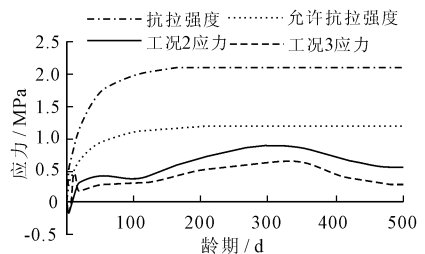


图 12 (工况 2 和工况 3)特征点 6 的应力历时曲线

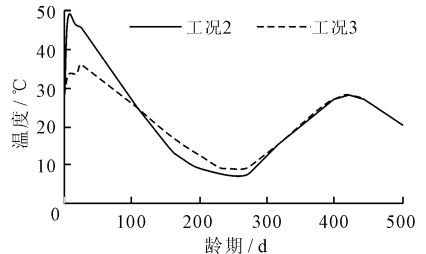


图 13 (工况 2 和工况 3)特征点 8 的温度历时曲线

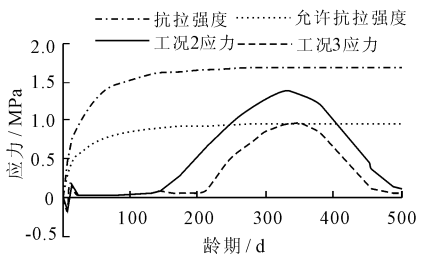


图 14 (工况 2 和工况 3)特征点 8 的应力历时曲线

仿真计算结果表明,在坝体内部特征 6 即高程 158.9 m 混凝土温度梯度小,其原因是环境温区域,最高温度达到 47.4℃,原因是该高程区坝体截面大,热量散失缓慢。从温度等值线分析可看出,温度场的分布由表及里温度逐渐增大,靠外表面的温度梯度大,坝体内部的温度梯度小,其原因是环境温度对坝体表层混凝土影响较大,而对内部混凝土影响较小,且上下游坝体表面温度随气温作周期性变化。应力方面,混凝土浇筑早期,坝体表面和施工仓面受昼夜温差影响较大,拉应力有所超标;坝体内部混凝土后期拉应力较大,  $\sigma_{1\max} = 1.63 \text{ MPa}$  (超限)。

(2) 昼夜温差是导致坝体表面以及混凝土浇筑仓面早期产生裂缝的主要原因,表面保温后,坝体混凝土上下游面以及浇筑层仓面受昼夜温差影响减小,早期拉应力超标现象消失。

(3) 在坝体混凝土内埋设冷却水管,高程 165.8 m 以下混凝土通水持续时间 12 d,高程 165.8 m 以上混凝土通水持续时间 10 d,冷却水水温约 10.0℃。坝体内部最高温度可降至 40.7℃,温度峰值削减约 6.7℃。混凝土内部最大拉应力从 1.63 MPa 下降到 1.1 MPa,防裂安全度大大提高。因此,施工时在坝体混凝土内埋设冷却水管进行一期冷却,可起到很显著的削峰降温效果,能明显改善坝体混凝土内部后期的应力状况。

(4) 仿真计算表明,个别区域,如坝体上下游表面混凝土区域,后期拉应力还是很大,超过混凝土的允许抗拉强度,混凝土将会产生裂缝。工况 3 的计算表明,如果在混凝土浇筑结束第一个冬季在坝体表面覆盖 5.0 cm 厚的大坝保温被,一直覆盖至第二年 3 月份,则上下游表面混凝土的拉应力会降低到混凝土的允许抗拉强度以内。

## 2 非溢流坝段混凝土防裂温控方案

通过仿真计算和初期浇筑成果分析,不同区域混凝土在不同季节浇筑需采取不同的温控措施,非溢流坝段集中在高温季节浇筑,非溢流坝段混凝土防裂温控方案主要是做好浇筑时的温控措施和冬季的温控措施。①浇筑温度要求自然入仓且不高于 28℃;②表面保护措施:仓面覆盖一层 3.0 cm 厚大坝保温被,覆盖 7~10 d。上下游面钢模板外贴 2.5 cm 厚聚乙稀苯板。拆模后在坝体表面覆盖 3.0 cm 厚大坝保温被,覆盖 5~8 d。拆模后仓面喷雾降温,上下游坝面及暴露的侧面流水养护;③水管冷却措施:冷却水管采用内径 28 mm、外径 32 mm 的 HDPE

管。水管层距×间距:高程 144.0~146.0 m 垫层混凝土和高程 146.0~148.0 m 强约束区混凝土采用 1.0 m×1.5 m;高程 148.0 m 以上弱约束区和非约束区混凝土采用 1.5 m×1.5 m。浇筑的同时就要通水,高程 165.8 m 以下混凝土通水 12 d,高程 165.8 m 以上混凝土通水 10 d。采用制冷水,水温约 10.0℃,流速 1.0 m/s,流量 2.2 m<sup>3</sup>/h,5 d 后流量减半,维持水温 10.0℃,流量 1.1 m<sup>3</sup>/h。前 5 d 每半天改变一次水流方向,此后每天改变一次水流方向;④在冬季时,坝体混凝土浇筑结束第一个冬季在坝体表面覆盖 5.0 cm 厚的大坝保温被,一直覆盖至第二年 3 月份。

## 3 结 语

陶岔渠首枢纽工程为大型闸坝工程,闸坝下部基岩对混凝土约束较大,施工中混凝土的早期水化反应快,热量释放集中,混凝土水化热温升大,因而混凝土裂缝问题突出。陶岔混凝土结构在内外温差、自生体积变形、基岩或底板或先浇筑的下层“老混凝土”的变形约束等作用下,很有可能会出现各类表面裂缝及深层裂缝,甚至贯穿性裂缝。通过施工防裂方法专题研究,明确不同区域混凝土在不同季节浇筑需采取不同的温控措施,并将研究成果直接指导现场混凝土的施工。陶岔渠首枢纽混凝土未发生深层及贯穿型裂缝,表面裂缝也极少,混凝土防裂效果良好。

### 参考文献:

- [1] 戴会超,王 建. 国内外水利水电工程混凝土裂缝及其防治技术研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2005.
- [2] 刘有志,张国新,朱岳明. 基于细观损伤模型的混凝土湿度及干缩特性研究[J]. 工程力学,2008,25(7):196~200.
- [3] 韦 未,姚伟明. 混凝土裂缝扩展模拟研究进展[J]. 水利水电科技进展,2004,24(4):53~56.
- [4] 李录贤,王铁军. 扩展有限元法(XFEM)及其应用[J]. 力学进展,2005,35(1):5~20.
- [5] 钟登华,吴康新,练继亮. 基于多 Agent 的混凝土坝施工仿真与优化研究[J]. 系统仿真学报,2008(2):222~226.
- [6] 朱岳明,徐之青,贺金仁,等. 混凝土水管冷却温度场的计算方法[J]. 长江科学院院报,2003,20(20):19~22.
- [7] 马跃峰,朱岳明,曹为民,等. 闸墩内部水管冷却和表面保温措施的抗裂作用研究[J]. 水利学报,2006,37(8):963~968.
- [8] 邵战涛,朱岳明,强 晟,等. 高寒地区混凝土重力坝温控防裂研究[J]. 三峡大学学报,2008,30(1):6~8.