

渐变流道混凝土结构施工期温度应力特性

孙巧荣¹, 强晟¹, 裘华锋², 张南南²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002)

摘要: 水电站和泵站的流道结构中存在着各种形式的流线形结构, 可以统称为渐变流道结构, 工程经验表明, 它们在施工期的应力发展特点不同于其他水工混凝土结构。以此类结构的某实际工程为研究对象, 采用数值仿真计算方法, 对不同约束形式影响下混凝土温度场和应力场的变化规律进行了深入分析。结果表明: 当结构的两个端部均被约束时, 产生的拉应力超过结构混凝土的抗拉强度, 极易发生贯穿性裂缝; 而任意一端被约束时与两端自由的应力状态差别不大。此外, 由于粗端与细端断面尺寸相差较大, 导致它们的温度场和应力场变化不同步, 相位差约3个月。

关键词: 渐变流道结构; 数值仿真; 约束; 温度场; 温度应力; 混凝土结构; 施工期

中图分类号: TV315 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)05-0191-06

Characteristics of temperature stress of concrete structure with gradual flow channel during construction period

SUN Qiaorong¹, QIANG Sheng¹, QIU Huafeng², ZHANG Nannan²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract: There are various streamlined schemes adopted in the flow channel structures of hydropower stations and pumping stations, which can be generalized as gradient flow channel structures. Based on previous engineering experience, the stress development characteristics of the gradient flow channel structures are different from those of other hydraulic concrete structures during the construction period. The development regularity of the temperature field and the stress field regarding concrete structures of this kind, with different forms of constraints applied, is studied and analyzed in depth through numerical simulation calculation. The results show that when both ends of the structure are constrained, the tensile stress will exceed the tensile strength of the structure concrete, and the penetrating cracks will easily occur. Whereas the stress state of the structure with both ends free of constraints is not significantly different from that with neither end being restricted. In addition, due to the large difference in cross-sectional dimensions between the thick end and thin end, their temperature field and stress field do not develop synchronously and the phase difference is about three months.

Key words: gradient flow channel structures; numerical simulation; constraint; temperature field; temperature stress; concrete structure; during construction period

1 研究背景

水泵广泛应用于农业灌溉、工业生产、城镇建设、跨流域调水等领域^[1], 目前我国是世界上拥有

泵站数量最多的国家。调查结果显示, 在大部分泵站中普遍存在流道裂缝, 而这些流道裂缝的存在和发展严重影响了泵站结构的承载力, 对泵站的安全造成隐患^[2]。因此, 如何有效地避免流道产生裂缝

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679074)

作者简介: 孙巧荣(1993-), 女, 江苏邳州人, 硕士研究生, 研究方向为大体积混凝土温控防裂。

通讯作者: 强晟(1977-), 男, 江苏宜兴人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大体积混凝土温控防裂。

是设计方和施工方都极为关注的问题,而研究流道的温度应力特点是避免其裂缝产生和发展的基础和关键。

目前,国内外在大体积混凝土温度应力数值分析与理论研究方面已经取得一定的成果^[3-6],我国在这一领域研究水平较高^[7],尤其在水闸、大坝等大型水工混凝土结构防裂方面研究成果显著^[8-15]。相比之下,结构型式更复杂的渐变流道结构的温度应力特点研究尚不成熟,故此类结构防裂效果仍不理想。在水电站厂房下部流道结构和泵站流道结构中,普遍存在着渐变式的混凝土流道,不仅在顺河向和横河向存在这样的结构形式,在结构的高度方向上也存在这种结构形式。图1、2给出了某泵站流道结构中含有类似结构的剖面。

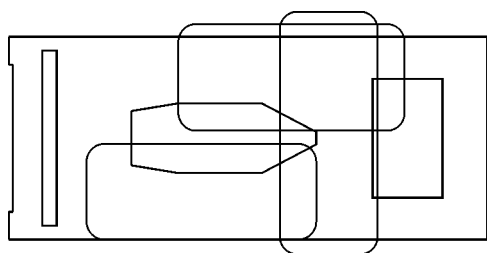


图1 某泵站的一个水平剖面

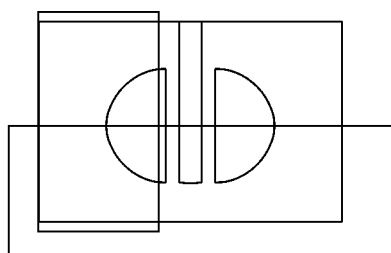


图2 某泵站的一个竖直剖面

2 仿真计算方法

2.1 非稳定温度场计算

在混凝土计算域 R 内任何一点处,不稳定温度场 $T(x, y, z, t)$ 必须满足热传导控制方程^[24]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

($\forall (x, y, z) \in R$)

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; α 为导温系数, m^2/h ; θ 为混凝土绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, d ; τ 为龄期, d 。

2.2 应力场计算

根据弹性徐变理论,计算混凝土施工期、运行期由于温度变化和体积变形等因素引起的应力变化规律采用增量初应变法^[24]。计算混凝土应变增量的主要内容有:弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量、干缩应变增量和自生体积应变增量,则:

$$\{\Delta \varepsilon_n\} = \{\Delta \varepsilon_n^e\} + \{\Delta \varepsilon_n^c\} + \{\Delta \varepsilon_n^T\} + \{\Delta \varepsilon_n^s\} + \{\Delta \varepsilon_n^0\} \quad (2)$$

式中: $\{\Delta \varepsilon_n^e\}$ 为弹性应变增量; $\{\Delta \varepsilon_n^c\}$ 为徐变应变增量; $\{\Delta \varepsilon_n^T\}$ 为温度应变增量; $\{\Delta \varepsilon_n^s\}$ 为干缩应变增量; $\{\Delta \varepsilon_n^0\}$ 为自生体积应变增量。

由于渐变流道有着变截面、异形、空间曲面结构、体型复杂的结构特殊性,很难将水闸、大坝等大体积混凝土的温度应力分布规律直接运用到渐变流道上。目前,国内主要采取有限单元法对流道施工期温度场和应力场进行时空动态分析^[2,16-20],研究中流道混凝土结构一般受到某一种特定的约束,其结论往往缺乏普遍适用性。此外,现有研究大多侧重于温控防裂措施,对温度应力一般性分布规律研究较少^[21]。

鉴于此,本文利用三维非稳定温度场和应力场有限元法及程序^[22-23],对此类渐变流道混凝土结构在不同约束形式下施工期的温度场和应力场,尝试提出一些普适性的规律,为设计、施工方提供参考。

2.3 本文基本假定

本文主要采用成熟的商业软件研究温度及约束形式对流道应力的影响,假定计算中的徐变和自生体积变形对应力产生的影响相互抵消。

3 混凝土温度场及应力场仿真模拟

3.1 有限元模型

本研究以华东地区某实际工程渐变流道结构为依托,选取土基、C25 混凝土底板和底板上部混凝土流线型渐变结构为研究对象,地基和底板的中心在同一铅直方向。有限元模型范围为:地基顺水流方向长 60 m,垂直于水流方向宽 30 m,深度 30 m;底板顺水流方向长 20 m,宽 14 m,高 2 m;上部流道混凝土结构顺水流方向长 20 m,细端宽度为 3 m,粗端宽度为 5 m,细端到粗端呈流线型渐变,流道高为 8 m。地基的角点设置为坐标系的原点,沿顺水流方向设为 x 轴,垂直于水流方向设为 y 轴,高度方向设为 z 轴。

根据上述研究对象建立有限元模型,地基和上部混凝土结构的网格划分模型如图3、4所示,单元总数为 32 160 个,节点总数为 36 425 个。

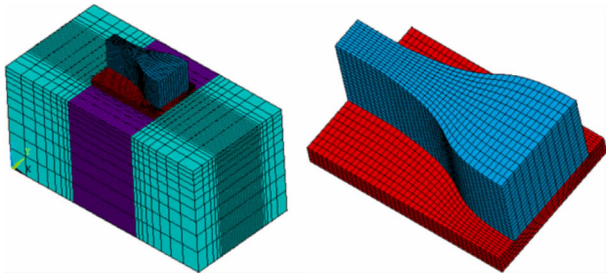


图 3 整体网格剖分图 图 4 混凝土结构网格剖分图

3.2 计算参数

为了便于计算,将多年月平均气温拟合为 1 条余弦曲线:

$$T_a(t) = 17.2 + 11.75 \times \cos\left[\frac{\pi}{6}(t - 7.2)\right] \quad (3)$$

式中: t 为时间(月)。计算中昼夜温差考虑为 10°C 。

计算中,混凝土热力学参数取值见表 1。其中,地基参数来源于有关地质资料和工程经验,混凝土参数根据设计单位提供的试验资料获得。

表 1 材料计算参数

材料	导热系数/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	比热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	导温系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	线膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/GPa
地基	3.02	1.83	0.0015	0.81×10^{-5}	1871.74	0.29	0.51
C25 混凝土	7.60	1.06	0.0030	1.00×10^{-5}	2353.45	0.17	36.00

C25 混凝土弹性模量 (GPa):

$$E(\tau) = 36 \times [1 - e^{-0.45\tau^{0.645}}] \quad (4)$$

式中: τ 为龄期,d,下同。

C25 混凝土抗拉强度 (MPa):

$$f_t(\tau) = 2.9 \times [1 - e^{-0.3\tau^{0.735}}] \quad (5)$$

绝热温升 θ ($^\circ\text{C}$):

$$\theta(\tau) = 46 \times [1 - e^{-0.44\tau^{0.73}}] \quad (6)$$

3.3 仿真计算方案

本文设置如下 4 种工况开展计算分析:

工况 1:混凝土结构两端施加法向约束;

工况 2:混凝土结构粗端施加法向约束,细端自由;

工况 3:混凝土结构细端施加法向约束,粗端自由;

工况 4:混凝土结构两端为自由状态。

从 2017 年 8 月 30 日开始浇筑结构底板,底板浇筑后 7 d 开始浇筑上部渐变流道混凝土结构,浇筑温度为 22°C 。

混凝土表面导热系数在未拆钢模板模时为 $20.83(\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}))$;龄期 14 d 拆模后,导热系数为 $62.38(\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}))$ 。

温度场计算中,地基的四周和侧面及混凝土约束

面假定为绝热边界,其余部位按第三类边界条件考虑。

应力场计算中,本文采用非线性弹性本构关系。地基的四周和底面施加法向约束,混凝土结构的约束根据各工况要求而定。为了便于分析,在混凝土结构的细端和粗端表面、内部各选取一个特征点,内部特征点所在剖面位置均为结构的纵向中心剖面,即 $y = 15.0 \text{ m}$ 剖面。表面特征点在内部特征点同一高度相应的表面位置($z = 34.5 \text{ m}$)。特征点位置如图 5 所示。

4 仿真计算结果分析

在仿真分析中,温度和应力的最大值及其出现的时间、部位是要解决的关键问题^[25]。本文采用典型剖面的温度及应力包络图和特征点温度及应力历时曲线进行表达。

4.1 温度场分布特性

图 6 给出了计算所得最高温度包络图;图 7~8 给出了温度历时曲线图。4 个工况计算条件的主要不同之处在于约束不同,故温度场非常接近,此处仅给出工况 1 的中心剖面温度包络图及其各特征点温度历时曲线。

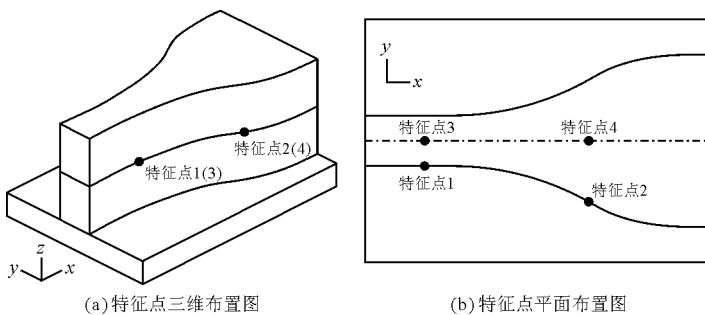


图 5 特征点位置示意图

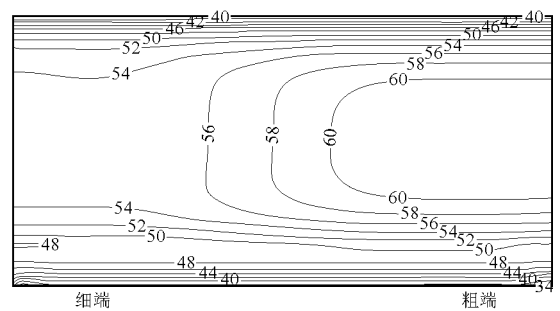


图 6 流道中心剖面最高温度分布(单位: $^\circ\text{C}$)

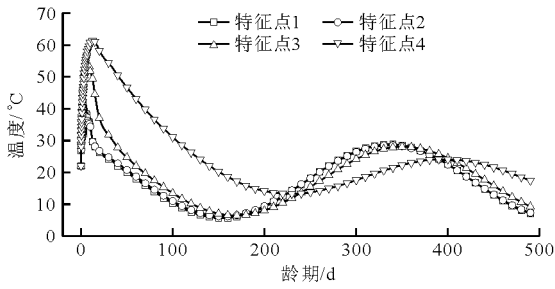


图7 各特征点温度历时曲线

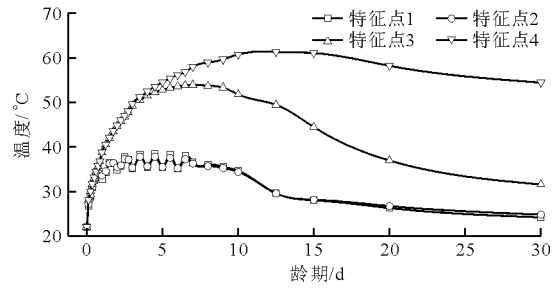


图8 早龄期各特征点温度历时曲线

根据温度场仿真计算结果可知：

(1) 温度场的分布表现为中心高、边界低，由表及里温度逐渐增大、温度梯度逐渐减小。其原因在于，水化反应过程中，外表面混凝土直接与外界相对低温的空气接触，表面热量散失相对较快，而内部混凝土散热条件较差，因此混凝土内部温度相对较高，外部温度相对较低。

(2) 该渐变流道的高温区发生在粗端内部，最高温度为61.31℃。这是由于粗端的混凝土方量较大，水化反应过程中产生热量较多，而混凝土是热的不良导体，内部热量不易散失，内部热量积压导致混凝土粗端内部温度升幅较大。

(3) 混凝土浇筑后，在水化热的作用下，混凝土温度急剧上升，受结构形状、散热条件等影响，渐变流道混凝土不同位置的温度峰值、最高温出现的时刻不一样。细端与粗端表面受昼夜温差等环境因素

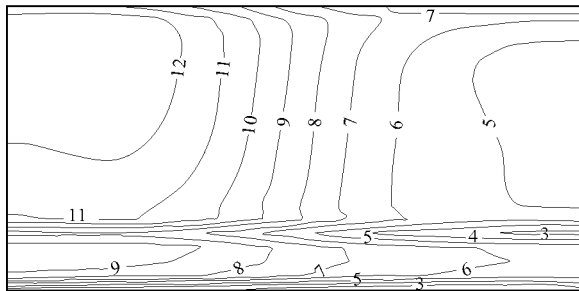
的影响比较大，早期温度随昼夜温差而上下波动。随后，混凝土温度逐渐下降，降温速率逐渐减小。其中，细端混凝土较薄，其内部温度受环境温度影响较粗端内部大，后期温度曲线与环境温度基本一致。粗端内部混凝土方量较大，温变速率滞后于细端内部，粗、细端温度相位差约3个月。

(4) 本工程施工期在夏末秋初，当渐变流道混凝土内部温度达到峰值时内外温差达到最大，约为31.75℃。因此应特别注意早期混凝土的表面保温和养护。

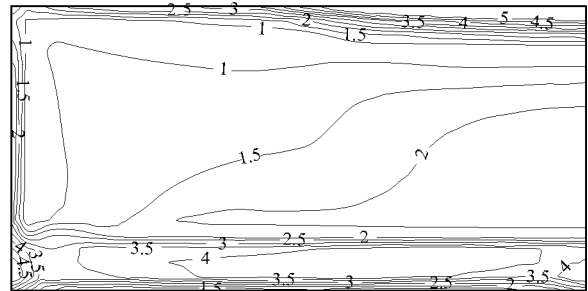
4.2 应力场分布特性

图9给出了4种不同约束条件下的中心剖面应力包络图。

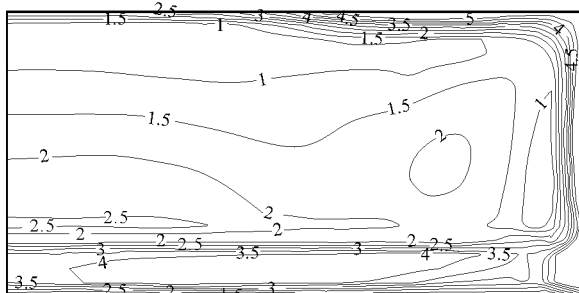
图10给出了4种工况各特征点的应力历时曲线，其中图10(a)为早龄期各特征点应力历时曲线，由于其他3个工况的早龄期特征点应力历时曲线非常相似，故仅给出工况1的早龄期应力历时曲线图。



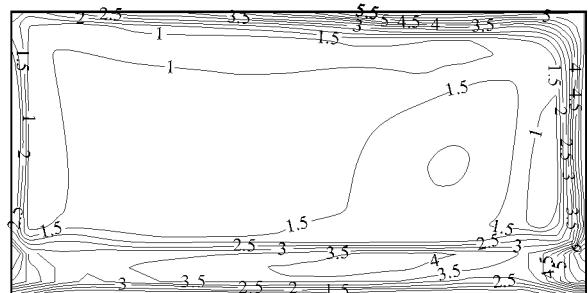
(a) 两端约束流道中心剖面第一主应力分布



(b) 粗端约束流道中心剖面第一主应力分布



(c) 细端约束流道中心剖面第一主应力分布



(d) 两端自由流道中心剖面第一主应力分布

图9 流道中心剖面第一主应力分布(单位:MPa)

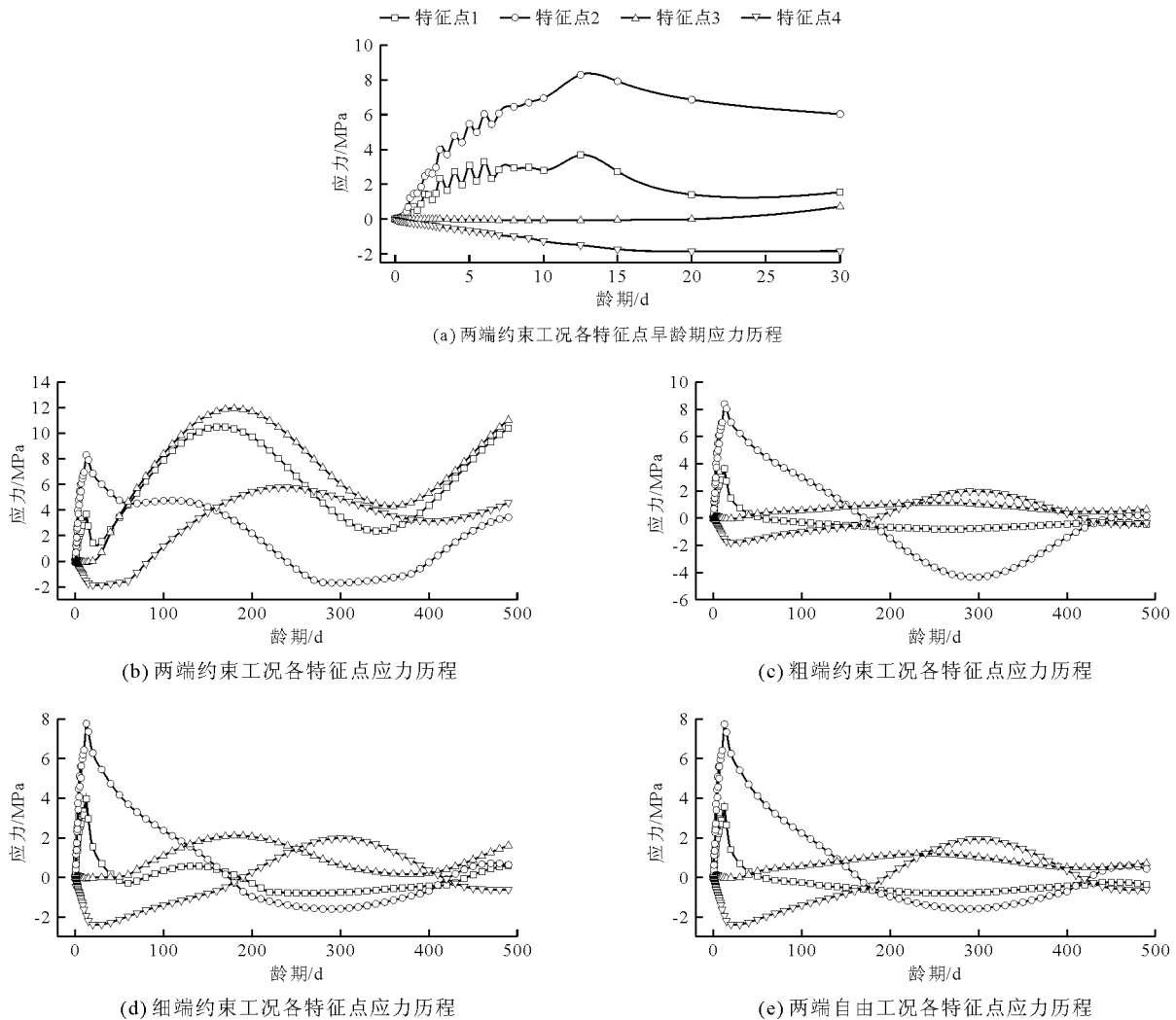


图 10 各特征点应力历程

根据应力场仿真计算可知:

(1)从图 10(a)可见,混凝土浇筑早期,在“外低内高”的内外温差作用下,内部混凝土膨胀量大于外部混凝土,混凝土表面相对收缩,且受到内部混凝土约束,故混凝土表面产生较大的拉应力。受昼夜温差的影响,表面拉应力上下波动。由于粗端混凝土厚度较大,内外温差大,所以早期粗端表面呈现出相对更大的拉应力。降温阶段,混凝土内部温降幅度大于表面混凝土的温降幅度,因此内部混凝土体积相对产生收缩,受表面混凝土和端部、底板的约束,内部逐渐由压应力转变为拉应力。

(2)由图 9(a)和图 10(b)可见,在渐变流道混凝土结构的两端均施加法向约束的工况(工况 1)下,细端的表面及内部都产生了较大的应力。而最大拉应力发生在冬季(约在龄期约 170~180 d 时),细端表面最大应力约 10.5 MPa,细端内部最大应力约 12.0 MPa。主要原因是后期温降过程中,混凝土

弹性模量大,体积收缩受到两端强约束后产生的拉应力大。无论是粗端还是细端,最大拉应力都大幅超过抗拉强度,致使混凝土任意部位都会产生贯穿性裂缝。

(3)由图 9(a)~(d)和图 10(b)~(e)可见,在仅粗端约束、仅细端约束、两端自由这 3 种工况(工况 2 到工况 4)下,粗端的内部最大拉应力均为 2.0 MPa 左右,而细端的内部最大拉应力则发生在仅细端约束情况下,为 2.0 MPa。可见,对于整个渐变流道结构来说,粗端本身就是一个较大的约束,其受外部约束影响较小,而细端则受到外部约束影响更大。

5 结 论

由渐变流道混凝土结构在不同约束情况下的施工期温度应力仿真分析计算结果,可得出以下结论:

(1)结构早龄期应力分布规律是:外部约束对早龄期表面应力影响很小,无论是粗端还是细端,无

论是否被约束,表面早龄期由于内外温差的作用,拉应力均超过抗拉强度,易出现表面裂缝。其中粗端由于内外温差更大,其早龄期表面拉应力也更大。因此在施工中要注意合理保温。

(2)结构晚龄期应力分布规律是:当结构的两个端部都被约束时,内部各处的最大拉应力均超过抗拉强度,其中细端的内部和表面晚龄期应力均比粗端更大,故细端更容易出现贯穿性裂缝;结构任意一端被约束时与两端自由时的内部最大拉应力大小接近。因此在设计时应注意合理分缝分块。

(3)由于粗端与细端断面尺寸相差较大,导致这两个端部温度受气温影响的变化不同步,冬季时,细端内部受外界气温的影响较快达到最低温,而粗端内部滞后约3个月才达到最低温,细端和粗端内部最大拉应力的相位差也大约为3个月。当然,该相位差与本文设置的结构厚度有关。

参考文献:

- [1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 陆银军, 曹邱林, 张杨, 等. 泵站进水流道混凝土施工期温控防裂研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(6): 71-74.
- [3] ABDULRAZEG A A, NOORZEI J, JAAFAR M S, et al. Thermal and structural analysis of RCC double-curvature arch dam [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2014, 20(3): 434-445.
- [4] MYERS T G, FOWKES N D, BALLIM Y. Modeling the cooling of concrete by piped water [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(12): 1375-1383.
- [5] LIN Peng, LI Qingbin, JIA Pinyu. A real-time temperature data transmission approach for intelligent cooling control of mass concrete [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014(8): 1-10.
- [6] 刘杏红, 马刚, 常晓林, 等. 基于热-流耦合精细算法的大体积混凝土水管冷却数值模拟[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 159-164.
- [7] 李明超, 张梦溪, 王孜越. 考虑诱导缝的碾压混凝土重力坝控裂结构温度场与温度应力数值分析[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 551-559+567.
- [8] LI Y B, HUANG D H, OUYANG J S. Fast algorithms of the simulation analysis of the thermal stresses on concrete dams during construction periods [J]. Physics Procedia, 2012, 24: 1171-1177.
- [9] 李守义, 马强, 张晓飞. 基于有限元等效应力法的高拱坝拱温度场研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(7): 88-94.
- [10] 井向阳, 常晓林, 周伟, 等. 高拱坝施工期温控防裂时空动态控制措施及工程应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(8): 705-712.
- [11] 朱岳明, 马跃峰, 王弘, 等. 碾压混凝土坝温度和应力仿真计算的均质层合单元法[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 120-124+113.
- [12] 董福品, 谢微, 谭玲, 等. 混凝土高坝温度应力仿真分析的三分区算法[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 227-231.
- [13] 强晟, 吴超, 朱振泱. 含冷却水管的混凝土的混凝土温度场复合单元新算法[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 739-748.
- [14] 张国新, 刘有志, 刘毅. 特高拱坝温度控制与防裂研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 382-389.
- [15] 王海波, 周君亮. 大型水闸闸墩施工期温度应力仿真和裂缝控制研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 169-174.
- [16] 许朴, 朱岳明. 宝应泵站肘形进水流道混凝土温度应力仿真计算[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(5): 56-58+64.
- [17] 张平. 南水北调东线万年闸泵站混凝土温控防裂措施[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 271-273+276.
- [18] 陈守开, 强晟, 郭磊, 等. 淮阴三站泵站贯流式流道混凝土温度和应力仿真分析[J]. 水利水电技术, 2011, 42(1): 44-47.
- [19] 丁淮波, 潘卫锋, 强晟. 泵站复杂流道结构施工期温控防裂研究[J]. 江苏水利, 2014(6): 8-9+12.
- [20] 何勇, 周益安, 别亚静, 等. 大型斜轴泵站流道结构商品混凝土温控防裂方法研究[J]. 浙江水利科技, 2016(4): 61-67.
- [21] 刘泽俊, 张占, 李延安, 等. 南水北调东线睢宁二站流道混凝土温控防裂措施[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 166-169.
- [22] BIE Y J, QIANG S, SUN X, et al. A new formula to estimate final temperature rise of concrete considering ultimate hydration based on equivalent age [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 514-520.
- [23] 王勛成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [24] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [25] 张国新, 罗健, 杨波, 等. 鱼筒河 RCC 拱坝的温度应力仿真分析及温控措施研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(5): 26-29.