

# 温度变化对大型预应力混凝土倒虹吸结构受力的影响

张龙飞<sup>1</sup>, 姚贤华<sup>1</sup>, 岳超然<sup>2</sup>, 管俊峰<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电学院, 郑州 450011; 2. 河南大河基础建设工程有限公司, 郑州 450008)

**摘要:** 预应力混凝土倒虹吸结构是一个受力状况复杂的大体积混凝土结构, 在温度变化作用下, 其应力状态难以确定。为此, 运用三维有限元对倒虹吸结构进行了数值分析, 确定其在无温度变化、最大温升、最大温降情况下9种工况的应力分布状态。结果表明, 在各种设计工况荷载作用下, 无温度变化时, 预应力混凝土倒虹吸结构均没有产生拉应力; 但在温度变化时, 工况Ⅱ和工况Ⅳ均产生了较大的拉应力。其中, 在温升情况下, 工况Ⅱ底板下表面和工况Ⅳ顶板上表面产生拉应力大小分别为1.53 MPa和1.72 MPa; 在温降情况下, 工况Ⅱ边墙内侧、工况Ⅳ顶板下表面、工况Ⅳ底板上表面和工况Ⅳ边墙内侧产生拉应力大小分别为1.36 MPa、1.77 MPa、1.85 MPa和1.65 MPa。因此, 温度变化对倒虹吸结构的影响是不容忽视的。

**关键词:** 温度变化; 倒虹吸; 温升; 温降; 有限元分析

**中图分类号:** TV 672.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0196-04

## Influences of Temperature Changes on Behaviors of Large Prestressed Concrete Inverted Siphon

ZHANG Long fei<sup>1</sup>, YAO Xi ar hua<sup>1</sup>, YUE Cha o ran<sup>2</sup>, GU AN Jur feng<sup>1</sup>

(1. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Henan Zhengzhou 450011;

2. Henan Dahe Engineering corporation of infrastructure, Henan Zhengzhou 450008)

**Abstract:** The structure of prestressed concrete inverted siphon is a large volume concrete structure with complex stresses, and the stress is difficult to be ascertained when the structure is affected by changing temperature. The structure of inverted siphon was analyzed using 3-D finite element method (FEM) to obtain the stress distributions under nine working conditions including no change of temperature, maximum temperature rise, and maximum temperature drop. The results showed that under several working conditions, the structure of prestressed concrete inverted siphon did not produce tensile stress with no change of temperature. The large tensile stress were produced under the working conditions I and III with temperature changes. Under the condition of temperature rise, the tensile stress was 1.53 MPa and 1.72 MPa, respectively, in the bottom surface of base plate for condition I and the top surface of apical plate for condition III. Under the condition of temperature drop, the tensile stress was 1.36 MPa, 1.77 MPa, 1.85 MPa, and 1.65 MPa, respectively, in the sidewall for condition I, in the bottom surface of apical plate for condition III, in the top surface of base plate for condition III, and in the sidewall for condition III. Therefore, temperature changes had significant impacts on the structure of inverted siphon.

**Key words:** temperature changes; inverted siphon; temperature rise; temperature drop; finite element analysis

南水北调中线工程是世界瞩目的大型跨流域调水工程, 涉及了大量的渡槽、倒虹吸、涵洞等建筑物。其中倒虹吸管是输水工程中重要的建筑物, 如果外露的钢筋混凝土管段出现裂缝, 将给结构带来很大的危害, 另外, 倒虹吸管受力复杂, 结构计算中不仅要考虑管身自重、内水压力、外水压力、土压力、摩擦力、地震作用力等, 还需考虑温度应力。以前对

倒虹吸结构配筋时, 往往不关注温度应力的影响, 或者把温度作用按照其他荷载引起的应力加上一定的百分比来考虑<sup>[1]</sup>。近年来一系列的数值分析和原型观测资料表明, 温度变化是一项非常重要的荷载, 在设计结构及配筋计算时, 应该考虑温度的作用<sup>[2-4]</sup>。本文以大型倒虹吸结构为研究对象, 利用三维有限元分析软件 ANSYS, 进行数值分析, 深入

收稿日期: 2013-01-23    修回日期: 2013-03-26    网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1311.045.html>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51209094); 海岸和近海工程国家重点实验室基金(LP1211)

作者简介: 张龙飞(1974-), 男, 河南濮阳人, 工程师, 硕士, 国家一级注册结构工程师, 主要从事工程结构分析方面的研究。E-mail: yaoxiaohua@ncwu.edu.cn

研究大型倒虹吸结构在没有温度作用、最高温升作用和最高温降作用等情况下,倒虹吸管身混凝土结构的应力状态,及其对倒虹吸混凝土结构的影响。

## 1 工程概况

本工程由南段倒虹吸、中间明渠和北段倒虹吸三大部分组成,其中南北段倒虹吸由进口检修闸、倒虹吸管、出口节制闸(或检修闸)等建筑物组成。南段倒虹吸长 1 250 m,中间明渠长 2 030 m,北段倒虹吸长 1 055 m。倒虹吸管为 3 孔 1 联,单孔过水断面尺寸(高×宽)6 6 m×6 5 m。管身为预应力混凝土箱形结构,采用 1 860 级高低松弛预应力钢绞线和曲线孔道真空辅助灌浆后张有黏结的预应力混凝土结构,结构尺寸为:底板、顶板及边墙厚度均为 1.0 m,中墙厚度为 0.8 m。倒虹吸断面示意图见图 1。

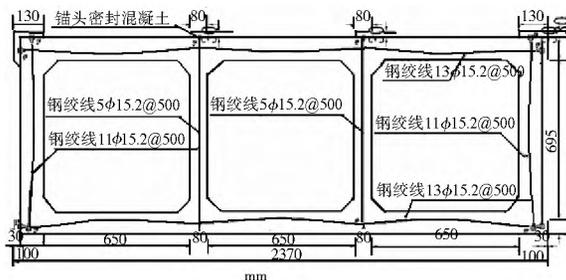


图 1 倒虹吸结构预应力钢筋布置

Fig. 1 Arrangement of prestressed reinforcements in the inverted siphon structure

## 2 设计参数及计算条件

### 2.1 管身段回填料

采用开挖的砂卵石土回填,湿容重: 20 kN/m<sup>3</sup>;饱和容重: 22 kN/m<sup>3</sup>;内摩擦角 33°。

### 2.2 天然地基

地基土层为砂壤土,主要指标见表 1。

表 1 地基土基本性能参数

Table 1 Basic performance parameters of the foundation soil

压缩模量	饱和快剪	压缩系数	天然含水率	孔隙比	承载力标准值	天然容重
$E_s / \text{MPa}$	$c / \text{kPa}$	$\alpha$	$W(\%)$	$e$	$f_{k} / \text{kPa}$	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
6.8	16.8	21.4	0.26	24.9	0.756	170

### 2.3 混凝土材料性能

倒虹吸管身段预应力混凝土 C40,钢筋混凝土重度 25 kN/m<sup>3</sup>。倒虹吸管身混凝土等级 C40。混凝土轴心抗压强度标准值  $f_{ck} = 26.8 \text{ MPa}$ ,设计值  $f_c = 19.5 \text{ MPa}$ ,混凝土轴心抗拉强度标准值  $f_{tk} = 2.45 \text{ MPa}$ ,弹性模量  $E_c = 3.25 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\nu_c = 0.167$ 。

### 2.4 温度参数

地温采用沙河市地区多年地温(地下 3.2 m 处温度)监测成果;气温采用沙河监测站多年各月平均气温监测成果;水温采用沙河水温监测成果。各种工况的温差情况见表 2。

表 2 各种工况温度作用分析成果

Table 2 Analysis of temperature effects of all working conditions

计算工况	温升(°C)			温降(°C)			备注
	数值	管内	管外	数值	管内	管外	
工况 Ñ	10.1	26.5	16.4	14.1	2.6	16.7	地温、水温
工况 ò	10.1	26.5	16.4	-	-	-	地温、水温
工况 ó	10.1	26.5	16.4	14.1	2.6	16.7	地温、水温
工况 ô	10.1	26.5	16.4	14.1	2.6	16.7	地温、水温
工况 õ	10.1	26.5	16.4	14.1	2.6	16.7	地温、水温
工况 õ	10.1	26.5	16.4	14.1	2.6	16.7	地温、水温
工况 ×	10.1	26.5	16.4	14.1	2.6	16.7	地温、水温
工况 ø	11.4	26.0	14.6	12.0	6.1	18.1	地温、气温
工况 ù	11.4	26.0	14.6	12.0	6.1	18.1	地温、气温

### 2.5 荷载及其组合

作用在倒虹吸结构上的荷载包括结构自重、倒虹吸内水自重和内水压力、倒虹吸顶部覆土和外水压力、倒虹吸外侧土压力和外水压力。根据倒虹吸的实际受力情况和工作条件,按下列设计工况进行荷载组合:工况 Ñ - 渠道设计水位、河道无水(最高地下水位);工况 ò - 渠道设计水位,河道设计洪水;工况 ó - 渠道加大水位,管顶土被校核洪水冲至管顶以上 0.5 m;工况 ô - 渠道设计水位,河道无水(最高地下水位),两边孔检修,中孔过水;工况 õ - 渠道设计水位,河道无水(最低地下水位),两边孔检修,中孔过水;工况 õ - 渠道设计水位,河道无水(最高地下水位),中孔检修,两边孔过水;工况 × - 渠道设计水位,河道无水(最低地下水位),中孔检修,两边孔过水;工况 ø - 完建期,管内无水,河道无水(最高地下水位);工况 ù - 完建期,管内无水,河道无水(最低地下水位)。

### 2.6 倒虹吸结构应力分析的三维有限元模型

由于倒虹吸预应力混凝土结构按抗裂设计,因此选用三维有限元弹性计算模型,并考虑地基和混凝土垫层对结构内力分布的影响。混凝土单元采用均化的钢筋混凝土折算弹性模量,不考虑预应力筋对结构刚度的增强作用,预应力钢筋对混凝土的作用力以单元节点通过专用程序施加<sup>[9]</sup>。在正常使用极限状态下,倒虹吸结构整体应力分析三维有限元数值计算采用 ANSYS 通用有限元分析软件中的 8 节点块体元。为简化计算,倒虹吸管两侧原位土和回填土对结构的影响均以外荷载代替<sup>[6]</sup>。考虑倒虹吸管下部地基土对结构内力分布的影响,由圣维南原理从倒虹吸管底部向下取地下基础厚度为 5.0 m,从倒虹吸管边竖墙向外取 10 m 进行模拟<sup>[7,8]</sup>。

在进行温度计算时,以多年平均温度对应的温度场作为初始温度场,最高温升和最大温降时对应的温度场为最终温度场,得到平均温度场相应于最高温升和最高温降时的温差,即为温度应力计算时的荷载。温度应力计算采用热-结构顺序耦合的分析方法,先进行热分析求得渡槽结构的温度场,然后再进行结构分析,将热分析得到的温度场作为荷载加到结构中,从而求得渡槽结构的应力分布。计算温度作用时,温度边界条件为:倒虹吸外侧采用地温,倒虹吸内侧采用水温(有水工况)或者空气温度(无水工况)。

倒虹吸结构三维整体有限元计算模型见图 2, 其中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标轴分别对应倒虹吸结构的横向、竖向和纵向, 倒虹吸结构横断面预应力节点荷载示意图见图 3。数值模型共计 62 090 个节点、54 250 个三维块体元。

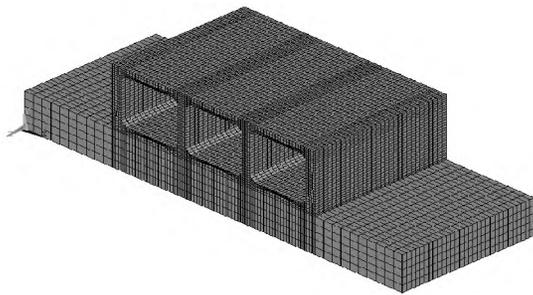


图 2 倒虹吸结构三维整体有限元计算模型

Fig. 2 Three dimensional finite element model of the inverted siphon structure

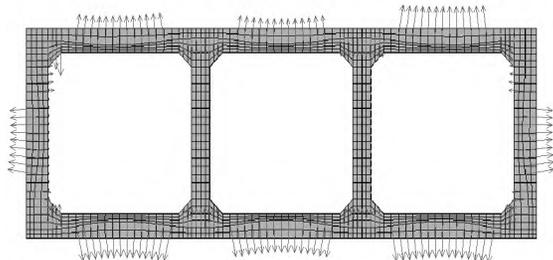


图 3 倒虹吸结构横断面预应力节点荷载示意图

Fig. 3 Cross sectional diagram of prestressed joint loading of the inverted siphon structure

### 3 有限元结果分析

#### 3.1 顶板正应力

##### 3.1.1 温升条件下的应力分布

在所有工况荷载作用下, 不考虑温度变化时, 顶板上表面和下表面均没有出现拉应力, 压应力也不大。比较所有工况荷载作用, 工况  $\tilde{N}$  渠道设计水位(最高地下水位)和工况  $\tilde{O}$  渠道加大水位条件下, 倒虹吸顶板上表面出现了较小的压应力。同时, 由表 2 可知, 从工况  $\tilde{N}$  到工况  $\tilde{X}$ , 倒虹吸内部温度受水温控制, 外部温度受地温控制, 夏季水温较高, 地温(倒虹吸管身埋于地下)相对较低, 使得倒虹吸内部温度高于外部温度, 温差达  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这样的温差导致了顶板表面原本压应力不大的边跨跨中(工况  $\tilde{N}$  和工况  $\tilde{O}$ ) 小部分地区内均出现了拉应力, 其中工况  $\tilde{O}$  拉应力较大。由图 4 可知, 应力值由无温度变化时的压应力值  $-1.76\text{ MPa}$ , 变化为温升时的拉应力值  $1.72\text{ MPa}$ 。

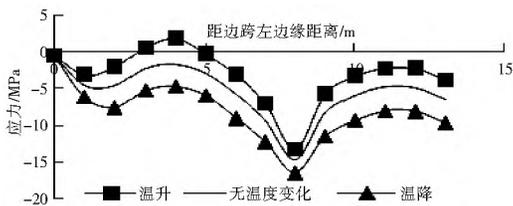


图 4 工况  $\tilde{O}$  顶板上表面应力变化曲线

Fig. 4 Variation of stress in the top surface of apical plate for condition  $\tilde{O}$

在工况  $\tilde{O}$  渠道加大水位作用下, 温升造成顶板下表面压应力整体趋于增大趋势, 最大压应力发生在边跨跨中, 最大压应力由无温度变化时的  $-10.5\text{ MPa}$  变化到温升时的  $-13.1\text{ MPa}$ (图 5), 压应力的增大对结果影响不大。

##### 3.1.2 温降条件下的应力分布

对于下表面, 当外界气温下降时, 比如在冬季 12 月份时, 气温和水温变化较大, 地温变化较小, 使得倒虹吸管内温度低于管外温度, 最大温降为  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。经分析, 在温降情况和荷载作用下, 在所有工况中, 工况  $\tilde{O}$  拉应力最大, 拉应力大小为  $1.77\text{ MPa}$ (图 5)。拉应力发生在顶板下表面距离倒虹吸左边缘  $6\sim 10\text{ m}$  范围内, 因为该位置处在倒虹吸管顶板与竖墙交接处, 因此, 应加强此处的构造措施。对于上表面, 温降使得压应力值增大, 压应力值由原来的  $-14.7\text{ MPa}$  变化到  $-16.5\text{ MPa}$ 。

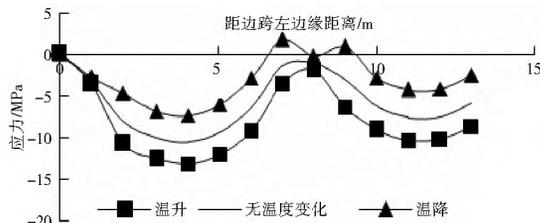


图 5 工况  $\tilde{O}$  顶板下表面应力变化曲线

Fig. 5 Variation of stress in the bottom surface of apical plate for condition III

#### 3.2 底板正应力

##### 3.2.1 温升条件下的应力分布

所有工况荷载作用下, 在不考虑温度变化时, 底板上表面均没有出现拉应力。大部分混凝土在施加预应力的作用下处于受压状态, 形成连续受压区, 压应力最大值为  $-10.92\text{ MPa}$ (工况  $\tilde{O}$ )。由图 6 可知, 对于底板上表面, 温升使得压应力趋于增大趋势, 最大压应力为  $-13.14\text{ MPa}$ 。由图 7 可知, 在工况  $\tilde{N}$  长期荷载作用下, 温升对底板下表面不利, 使底板下表面距离边跨左边缘  $3\sim 6\text{ m}$  范围和距离边跨左边缘  $10\sim 12.4\text{ m}$  范围内均出现拉应力, 拉应力最大值分别为  $1.53\text{ MPa}$  和  $0.86\text{ MPa}$ 。

对于工况  $\tilde{O}$  和工况  $\tilde{U}$ , 温升对倒虹吸底板下边缘是不利的, 虽然温升值较高( $11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 但由于完建期内无水, 减小了内水压力, 使得底板下边缘仅出现了较小的拉应力( $0.13\text{ MPa}$ ), 说明内水压力影响较大。

##### 3.2.2 温降条件下的应力分布

在温降情况下, 工况  $\tilde{O}$  在底板上表面边跨左边与边墙交接处以及中跨上表面右边与中墙交接处均出现应力集中, 拉应力较大, 分别为  $1.28\text{ MPa}$  和  $1.85\text{ MPa}$ , 见图 6。

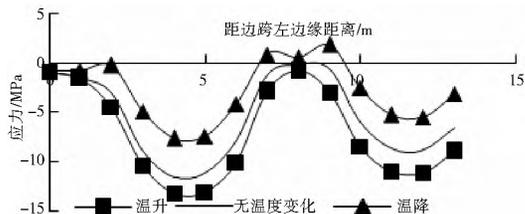


图 6 工况  $\tilde{O}$  底板上表面应力变化曲线

Fig. 6 Variation of stress in the top surface of base plate for condition III

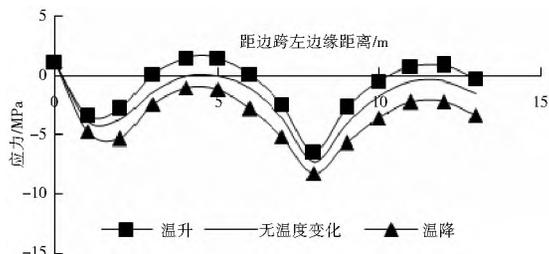


图7 工况Ⅲ底板下表面应力变化曲线

Fig. 7 Variation of stress in the bottom surface of base plate for condition III

### 3.3 边墙和中墙正应力

所有工况荷载作用下,在不考虑温度变化和温升时,边墙左右表面均没有出现拉应力。在施加预应力的作用下混凝土处于受压状态,形成连续受压区,压应力最大值为 $-12.75$  MPa。

此时,温升对于倒虹吸管内侧是有利的,温升使得管内侧混凝土膨胀,减小了拉应力。相反,温升对于倒虹吸管外侧是不利的,但曲线预应力筋的作用对倒虹吸管外侧拉应力具有缓冲作用。因此,整体作用使得倒虹吸管外侧并没有产生拉应力。

降温时,在工况Ⅲ(渠道设计水位、河道无水)长期荷载作用下和工况Ⅳ(渠道加大水位,管顶土被校核洪水冲至管顶以上 $0.5$  m)短期荷载作用下,边墙内侧与顶板上表面交接处出现应力集中,局部拉应力较大,最大拉应力分别为 $1.36$  MPa和 $1.65$  MPa。此处,温降对倒虹吸结构内侧是不利的,使得倒虹吸管内侧混凝土收缩,加剧了倒虹吸管内侧混凝土拉应力<sup>[9]</sup>。

中墙在所有工况荷载作用下,不考虑温度变化时和温升、温降情况下均没有出现拉应力,且压应力不大,最大压应力为 $8.3$  MPa,相当于混凝土轴心抗压强度标准值的 $31\%$ ,保证正常使用状态下混凝土受压徐变在弹性范围内。因此,中墙预应力筋采用直线型完全满足要求。

## 4 结语

在所有工况荷载作用下,温度变化时,工况Ⅲ和工况Ⅳ均产生了较大的拉应力,其中,工况Ⅳ温降时在底板上边缘与中墙交接处产生了较大的拉应力,拉应力大小为 $1.85$  MPa,温升时,在边跨跨中产生了较大的拉应力,拉应力值为 $1.72$  MPa。

从计算结果看,温度变化产生的拉应力不容忽视,在进行混凝土倒虹吸结构的设计过程中,必须全面考虑温度荷载,以往设计中简化甚至忽略温度荷载的做法是不合理的。

### 参考文献(References):

[1] 王林玉,朱向荣,钟秉章.岩石抗力和内外温差对大型水电站蜗

壳结构的影响[J].浙江大学学报(工学版),2000,34(4):433-437.(WANG Lir yu,ZHU Xiang rong,ZHONG Bing zhang. Influence of Rock Resistance and Temperature Difference on the Spiral Casing Structure of Large sized Hydropower Station [J]. Journal of Zhejiang University, 2000, 34(4): 433-437. (in Chinese))

[2] Verma Vishnu, Ghosh A K, kushwaha H S, Temperature Distribution and Thermal Stress Analysis of Ball tank Subjected to Solar Radiation[J]. Journal of Vessel Technology, 2005, 127: 119-122.

[3] Lee Y S, Choi M H, et al. A Structural Analysis of the Circular Cylinder with Multi Holes Under Thermal Loading[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 212: 273-279.

[4] Chen Yaolong, Wang Changjiang, Li Shouyi, et al. Simulation Analysis of Thermal Stress of RCC Dams Using 3D Finite Element Relocation Mesh Method[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32: 677-682.

[5] 李晓克,严振瑞,赵顺波,等.浅埋式预应力混凝土压力管道结构设计与技术经济比较[J].水利水电技术,2002,(6):20-25.(LI Xiaoke,YAN Zhenrui,ZHAO Shurbo, et al. Design and Technical Economy Analysis of Prestressed Concrete Penstock Shallow Buried Under Earth[J]. Water resources and hydropower engineering, 2002, (6): 20-25. (in Chinese))

[6] 唐献富.沁河倒虹吸预应力混凝土结构分析[J].南水北调与水利科技,2008,6(4):34-35.(TANG Xianfu. Internal Force Analysis and Reinforcing of Qin River Inverted Siphon Prestressed Concrete Structure[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technolog, 2008, 6(4): 34-35. (in Chinese))

[7] 姚贤华,裴松伟,赵顺波.高压旋喷桩复合地基承载特性的有限元分析[J].华北水利水电学院学报,2009,30(1):93-95.(YAO Xianhua, PEI Songwei, ZHAO Shurbo. Finite Element Analysis of Load-carrying Capacity with Composite Foundation of High Pressure Rotary Grouting Pile[J]. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2009, 30(1): 93-95. (in Chinese))

[8] 赵顺波,姚贤华,裴松伟,等.回填土区深层搅拌桩和高压旋喷桩复合地基的静承载性能[J].中国港湾建设,2008,(1):16-20.(ZHAO Shurbo, YAO Xianhua, PEI Songwei, et al. Study on Static Bearing Capacity of Composite Foundations with Deep Mixing Pile and High Pressure Rotary Grouting Pile in Backfill Ground[J]. China Harbor engineering, 2008, (1): 16-20. (in Chinese))

[9] 连继建,喻刚,王海军.温度变化对水电站蜗壳结构配筋的影响[J].天津大学学报,2006,(8):957-962.(LIAN Jijian, YU Gang, WANG Haijun. Influence of Changing Temperature on Reinforcing Bars of Spiral Casing Structure in a Hydropower Station[J]. Journal of Tianjin university, 2006, (8): 957-962. (in Chinese))