

文章编号:1007-6492(2001)03-0034-04

## 钢管混凝土拱组合梁渡槽结构静力分析

李宗坤<sup>1</sup>,何世玲<sup>2</sup>,胡良明<sup>1</sup>,朱明霞<sup>3</sup>

(1. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 2. 开封大学建筑工程系, 河南 开封 475000; 3. 郑州大学工程力学系, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 针对钢管混凝土拱组合梁渡槽复杂结构, 建立了合理的有限元模型, 编制了前后处理程序, 并利用 Sup 91 程序对结构整体进行了计算和分析, 给出了渡槽结构各构件在不同荷载组合情况下的应力、应变及其最大值所发生的部位, 提出了结构尺寸调整的合理化建议, 为工程设计单位提供了有价值的分析结果, 为渡槽结构优化造型的初步设计提供依据。

**关键词:** 钢管混凝土; 拱组合梁; 有限元; 结构静力分析

**中图分类号:** TV 332.14

**文献标识码:** A

### 0 引言

钢管混凝土拱组合梁渡槽是南水北调中线穿黄输水建筑物方案之一, 渡槽每跨 100 m, 槽体宽约 13 m, 如图 1 所示。渡槽除自重荷载外, 还承受巨大的水荷载(533 kN/m)以及风荷载、温度荷载、汽车荷载、活荷载和地震荷载等。渡槽的结构也是十分复杂的, 渡槽槽体由底板、侧板、槽侧柱、槽底横向梁、槽顶横梁、槽侧顶及底部纵向梁组成, 钢管混凝土拱上有钢管混凝土拱圈, 两拱梁之间有横向系梁, 拱梁与槽体之向有吊杆相联结。从材料上分析, 有长方形截面的混凝土梁、工字钢构件、钢管混凝土构件、以及钢绞线吊杆单元构件。因此, 对渡槽体系进行结构分析不仅难度大, 而且计算工作量大, 程序的前后处理也非常烦琐<sup>[1]</sup>。

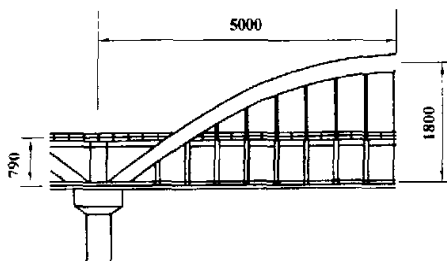


图1 渡槽结构立视图(单位:cm)

Fig.1 Aqueduct elevation

### 1 有限元模型的建立

为了将渡槽的复杂结构简化为合理的力学分析模型, 在网格划分时采用了下列假定<sup>[2]</sup>:

(1) 支座采用块体单元模拟, 拱梁直接与支座相联, 槽壁与拱梁之间通过点接触以实现力的传递, 而不是面接触。

(2) 槽体采用加肋板模型模拟, 即采用板单元和梁单元的组合结构, 梁单元中性轴与板不一致的影响通过加入刚性梁元进行模拟。如图 2 所示。

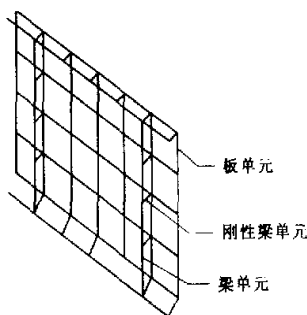


图2 板和梁组合的加肋板模型

Fig.2 Put in rib with plate and beam

(3) 槽各跨假定是分离的, 即可取一跨进行计算, 并将该跨的一端固定, 另一端自由。

(4) 将拱单元模拟为三维块体单元, 在简化

收稿日期:2001-05-07;修订日期:2001-06-25

作者简介:李宗坤(1961-),男,河南省邓州市人,郑州大学副教授,大连理工大学博士研究生,主要从事水工结构研究和大坝安全性评价方面的研究。

时,拱梁的截面是将钢管的刚度等价转化为混凝土来考虑的,并认为拱梁截面是近似的长方形,该长方形内用16个块体单元来逼近,这在有限元分析方面是可以满足应力精度要求的。

(5) 在吊杆单元与拱梁块体单元相接触的部位,为了消除过分的应力集中现象,通过在拱梁截面内设置杆单元以使吊杆的轴向力主要由截面来承担,使截面应力更为合理。

(6) 吊杆单元的一端接于拱梁刚杆单元的中间,另一端与槽壁的竖向梁单元联接,用杆单元进行模拟。

(7) 在处理钢管混凝土梁单元时,将混凝土的刚度按刚度等价的原则转化为钢管的刚度。

(8) 约束条件:在渡槽一端槽墩顶部与支座接触的部位,有一列节点是固定的,将其三个方向的自由度约束,其他约束节点只约束垂向和顺河向自由度。

根据上述考虑,由网格自动剖分软件对结构进行剖分,共划分4880个单元,4116个结点,并采用Sup 91程序计算。

## 2 计算荷载

(1) 槽体内水荷载:槽体内水深4.85 m,以面荷载的形式作用在渡槽底板和侧板上。

(2) 槽面活荷载:将人群荷载和汽-10级荷载均布于槽顶面的节点上,按集中力处理。

(3) 风荷载:只考虑渡槽槽体、拱圈承受风压力。

(4) 温度荷载:渡槽每跨纵向长度为100 m,钢结构和混凝土结构对温度较为敏感,在温度作用下可能会出现明显的变形,不可忽视。另一方面,渡槽内的水流量大,水的比热高,水体的温度直接会影响到渡槽立体的温度场,再者水的温度相对空气温度而言,变化幅度要小得多,所以槽内水体具有调节和控制渡槽温度场的效应,可有效降低由于空气温度剧降所引起的较大的温度应力,尤其是可有效降低由于一天内温度变化所引起的温度应力,所以,在渡槽结构的静力分析中,将只考虑由于温度升高所产生的温度应力。

为了考虑最不利情况,选用无水期的温度变化进行温度荷载计算,并认为最大可能的温度变化为27.5℃,温度荷载是通过各类单元温度荷载的形式施加。

(5) 预应力:为了有效减少渡槽内力,使荷载主要由拱梁承担,特别在吊杆、底板、拉梁位置施

加了预应力,每根纵梁施加28000 kN压力;每根吊杆施加2325 kN压力;槽体底板每5 m板施加392 kN压力,并施加30.12 kN·m的集中弯矩,以考虑由于预应力不位于板的中性轴上所产生的偏心弯矩。

## 3 材料参数

渡槽所使用的材料主要有混凝土、钢管、钢绞线等,它们的力学参数见表1。

表1 材料的力学参数

Table 1 Mechanics parameter of material

材料名称	弹性模量/MPa	泊松比	热胀系数	体积质量/(kg/m <sup>3</sup> )
混凝土 C50, C60	34500	0.17	1.0E-5	2500
钢管	200000	0.26	1.2E-5	7800
钢绞线	180000	0.26	1.2E-5	7800

## 4 计算工况

根据渡槽的实际受力特点和可能出现的最不利荷载组合,共对4种工况进行了结构静力分析。

①槽体自重+预应力;②自重+水压力+预应力;③自重+水压力+风压力+活荷载+预应力;④自重+水压力+温升(27.5℃)+预应力。

## 5 计算结果及分析

由于渡槽结构网格剖分的规模较大,网格密,单元及节点数很多,其结果文件信息量很大,在如此浩大的信息中,如何提取出主要的结果是非常重要的,尤其空间梁单元的应力很难表达<sup>[3]</sup>。为此,将渡槽结构各个构件从整体中提取出来,针对单个构件进行分析,并给出结构构件不同部位的应力、应变及变形结果,本文主要给出应力结果。

### 5.1 拱梁应力

图3是4种工况下拱梁不同位置处轴向应力平均值的对比图。由图可见,跨中60 m范围内整个拱梁是压应力,且轴向应力变化不大,这不仅说明拱梁较好地传递了压应力,同时也体现了拱梁发挥钢管混凝土承受压应力的特点。图4给出了4种工况下拱梁不同位置处主应力平均值,由图可见除支座处主应力的最大值及最小值差异较大外,整个拱梁内的主应力分布较为平滑,主应力的最大值一般小于3.0 MPa。从图5中还可看出,由于温度荷载的作用,拱梁主应力的平均值增加很多。

### 5.2 渡槽底板应力

渡槽底板横向跨度12 m,其上作用有近5 m

深的水荷载,使渡槽底板上应力明显.经计算,槽体底板在工况 1 荷载作用下,底板上下表面均为压应力,其最大值为  $\sigma_{xx} = 8.2 \text{ MPa}$ (顺槽向),位置在槽底板与支座接触的部位,该应力值主要是预应力作用的结果.

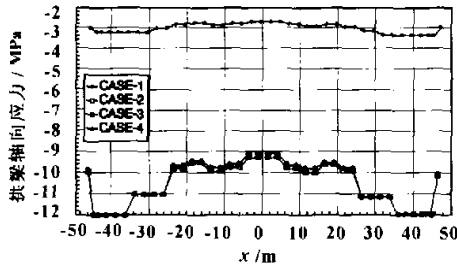


图 3 渡槽拱梁不同位置各工况轴向应力对比图

Fig.3 Arched beam in every place axial stress of different kinds of operating model

在工况 4 荷载作用下,底板下表面的  $\sigma_{xx}$  基本上都有压应力,压应力最大值为  $\sigma_{xx} = 8.8 \text{ MPa}$ ,而上表面的拉应力较大,最大为  $4.23 \text{ MPa}$ ,拉压应力最大值均发生在槽底与支座接触部位,见图 5、图 6.槽底板横向应力  $\sigma_{yy}$  上下表面均较小,且都为压应力.

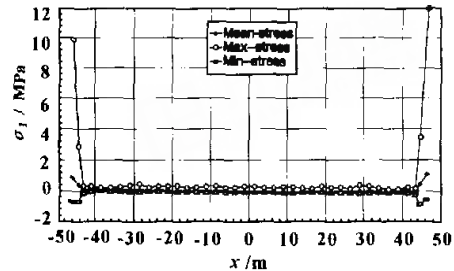


图 4 渡槽拱梁不同位置处最大主应力图(工况 1)

Fig.4 Arched beam in every place maximum stress of the first kind of operating model

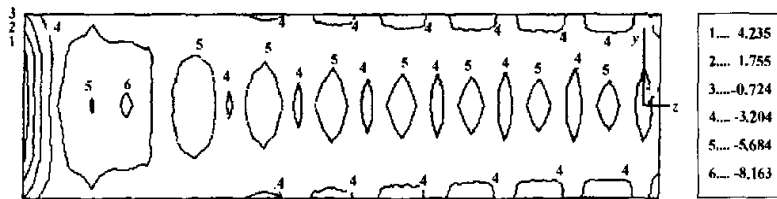


图 5 渡槽底板上表面  $\sigma_{xx}$  等值线图(工况 4)(单位:MPa)

Fig.5 The upper part of aqueduct bottom plate  $\sigma_{xx}$  isogram of the fourth kind of operating model

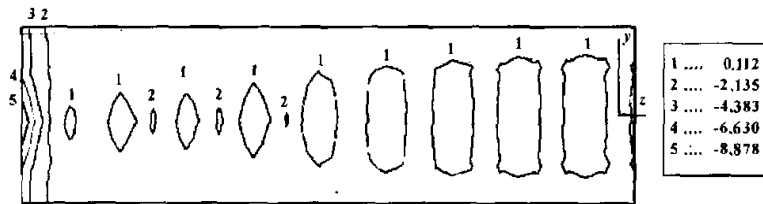


图 6 渡槽底板下表面  $\sigma_{xx}$  等值线图(工况 4)(单位:MPa)

Fig.6 The below part of aqueduct bottom plate  $\sigma_{xx}$  isogram of the fourth kind of operating model

### 5.3 渡槽顶纵梁应力

槽顶纵梁的材料是工字钢,其上部与吊杆单元联结,下部与渡槽侧板构成一体,是渡槽结构的主要构件,在剖分时按梁单元进行模拟。 $\sigma_{\max} = (|P/A| + |\sigma_2| + |\sigma_3|)$ 。式中： $P$  为轴向内力； $A$  为工字钢截面积； $\sigma_2, \sigma_3$  为两向弯曲应力。由计算得知：在距支座 5 m 处槽顶纵梁的拉应力最大，达  $46 \text{ MPa}$ ；纵梁中央的压应力最大达  $80 \text{ MPa}$ 。

### 5.4 槽底纵梁的应力

槽底纵梁为钢管混凝土结构,在结构上与底板和侧板、支座、槽底横梁、槽侧柱等构件相联结,

也是渡槽结构的主要构件之一。有限元网格剖分时是将混凝土和钢管分开考虑的,由于两者的变形是协调一致的,所以钢管的应力与混凝土应力之比值是两弹模值之比,故本文分析时只给出钢管所受应力。混凝土所受应力为钢管应力的 5.8 分之一。

槽底纵向梁的最大应力表达式与槽顶纵向梁最大应力表达式相同,通过计算可见,跨中一段槽底纵梁的最大应力最大,其数值为  $18 \text{ MPa}$ 。考虑温度荷载以后(工况 4),纵梁边缘两点处局部压应力最大,为  $140 \text{ MPa}$ ,这主要是由于该部位是渡槽纵向截面突变的部位,并且在该部位施加了较

大的预应力,使得该部位的压应力较大。

受篇幅限制,结构其他构件的应力计算结果在这里不再给出。另外,本文还对渡槽结构在4种荷载组合下的槽体和拱圈的静力变形进行分析。从分析结果看,渡槽综合位移(三向位移矢量之和)的最大值发生在槽底中央,为5.8 mm,其主要位移分量为垂向位移,反映了渡槽结构的受力特点。

## 6 结束语

通过对渡槽结构主要构件的变形和应力分析,可以看出除局部应力较大外,整体结构的应

力、变形基本满足设计要求,但局部应力可通过构造措施降低应力水平。另一方面,由于渡槽结构本身的特点,槽体自身的刚度较大,拱梁的刚度相对较小,使得拱梁没有有效地发挥拱的效应,拱顶压应力仍有很大的余地。

## 参考文献:

- [1] 彭宣茂.有限元计算的前后图形处理,水利水电微机应用,1991(1):94-97.
- [2] 彭宣茂,钱向东.复杂组合有限元网格的自动部分,计算力学理论与应用[M].北京:科学出版社,1992.
- [3] 彭宣茂,郑雄.三维有限元网格的高效消隐技术,计算结构力学及其应用,1990(4):106-112.

## Structural Static Analysis of Steel Tube Concrete Arched Combined Beam Aqueduct

LI Zong-kun<sup>1</sup>, HE Shi-ling<sup>2</sup>, HU Liang-ming<sup>1</sup>, ZHU Ming-xia<sup>3</sup>

(1. College of Environmental & Hydraulic, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Architectural Engineering, Kaifeng University, Kaifeng 455000, China; 3. Department of Engineering Mechanics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** This article established a reasonable finite unit model, worked out the managing program before and after in allusion to the complicated structure of the steel tube concrete arched combined beam aqueduct, calculated and analyzed the structural mass by using SUP91 program, gave the stresses and strains of aqueduct structural member in different loads-combined, and gave the place of maximum stress and strain. It also put forward the rationalization proposal of adjustment of structural size, presented valuable results for the engineering design company, and provided foundation for the optimization of the model selection and primary design.

**Key words:** steel tube concrete; arched combined beam; finite unit; structural static analysis