

文章编号:1006-2106(2015)03-0041-05

截面形状对双肢薄壁墩温度场的影响分析^{*}

张运波^{**} 蔡亭亭 刘 洋

(石家庄铁道大学, 石家庄 050043)

摘要:研究目的:置于自然环境下的墩台大跨混凝土结构,难免要受到日照温度荷载的作用,在这种荷载作用下,双肢薄壁墩会产生较大的温度应力与变形,严重的会引起墩身工程事故。本文以邢汾高速公路洛水大桥 105.09 m 高的双肢矩形薄壁空心墩为研究对象,利用 ANSYS 有限元软件的热分析及耦合分析功能,对不同截面形状的薄壁空心高墩在日照辐射作用下的温差效应进行仿真分析。

研究结论:计算结果表明:(1)有限元软件 ANSYS 的热分析以及耦合分析功能可以快速方便的计算双肢薄壁墩结构的温度场和温差效应;(2)温度应力随着截面边棱的增加而增加,而结构的变形却随着截面边棱的增加而减小;(3)温度应力的最大值一般在截面的角隅处出现;(4)在设计不同截面的双肢墩时,应综合考虑不同截面形状对温度应力以及变形的影响,选择合适的截面形状,使得高桥墩的温度裂缝控制在最小范围内;(5)该研究成果可以为薄壁高墩的设计和施工提供参考。

关键词:双肢薄壁墩;截面形状;仿真分析;温度效应

中图分类号:U441.5 文献标识码:A

Effects Analysis of the Cross – sectional Shape on Double – limb Thin – walled Piers' Temperature Field

ZHANG Yun – bo, CAI Ting – ting, LIU Yang

(Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Research purposes: The concrete structures with high pier and long span placed on the natural environment, inevitably exposed to the direct sunlight temperature load effect, in this load, the double – limb thin – walled pier will have a greater temperature stress and deformation and cause serious engineering accident. This paper focuses on Mingshui bridge's 105.09m double – limb and rectangular hollow pier of Xingtai – Fenyang Highway, using ANSYS finite element analysis software's thermal analysis and coupled analysis, analyzes the temperature difference effect of the thin – walled hollow high pier with different cross – sectional shapes under the solar radiation in the simulation analysis.

Research conclusions: The results shows that: (1) ANSYS finite element analysis software's thermal analysis and coupled analysis can calculate double – limb thin – walled pier's temperature field and temperature difference effect. (2) Temperature stress increases with the section edges increasing, but the deformable structure decreases with the section edges increasing. (3) The maximum temperature stress in general appears at the corner of the section. (4) When design the double – limb piers in different sections, the effect of the different cross – sectional shapes on the temperature stress and deformation should be considered, and select the appropriate cross – sectional shape to make high bridge pier's temperature cracks in minimum range. (5) The research results can provide a reference for design and construction of thin – walled high piers.

Key words: double – limb thin – walled pier; cross – sectional shape; simulation analysis; temperature effect

^{*} 收稿日期:2014-11-14

^{**} 作者简介:张运波,1971 年出生,男,副教授。

随着我国高速公路以及高速铁路建设的蓬勃发展,桥梁建设的发展逐渐向深山峡谷中延伸。在深山峡谷中进行桥梁的建设,其中高墩大跨连续刚构桥是一种很有竞争力的桥型。由于双肢薄壁墩是一种受力特点符合该类型桥梁的高墩,这就导致双肢薄壁墩得到了大量的应用。

置于自然环境下的双肢薄壁墩结构,必然长期受到日照辐射的影响。由于外界环境的瞬变性,再加上混凝土结构自身导热性能差的特点,使得空心墩内外壁板之间产生了较大的温差,当由此温差产生的温度变形受到支座等结构的约束时,温差应力就产生了,因此,把这种由于温差作用产生的温度应力以及变形叫做温差效应^[1-2]。桥墩自身结构形式的改变会对温度效应产生影响,比如针对不同类型的桥梁结构,对其跨径以及承载能力的要求也不同,这就使得双肢墩结构的截面形状随着对跨径以及承载能力的不同要求而改变。因此,为了保证桥墩结构的安全性,很有必要对双肢墩结构改变截面形状的情况进行研究。所以,对双肢薄壁空心高墩的温度场和温差效应进行研究具有重要的现实意义和科研价值。

目前,ANSYS 有限元软件的应用已得到快速发展,用此软件计算的结果有较高的准确性和可信度。本文以某高墩大跨连续刚构桥 105.09 m 的双肢等截面矩形空心墩为研究对象,利用 ANSYS 有限元软件热分析及耦合分析功能,对此双肢墩的日照温度场和温差效应进行研究,分析计算在悬臂状态下,改变双肢墩的截面形状、墩壁厚度以及风速对其温度场的影响,并得出有益的结论。

1 利用 ANSYS 进行瞬态热分析步骤

1.1 建立分析模型

1.1.1 选定单元类型,设置材料属性

ANSYS 中专门用于热分析的单元有 14 种^[3],但是考虑到四边形空心墩截面的折线折角比较多的特点,为了提高计算精度,本文网格划分采用的是四边形单元 PLANE77。单元材料的热物理性能:混凝土的密度为 2 600 kg/m³,比热 925 J/(kg·℃),热传导系数 3.3 W/(m·℃)。

1.1.2 单元网格划分

本文按照两个墩的实际截面尺寸建立二维模型,自由网格划分采用的是 0.2 m 大小的单元。墩身横截面有限元模型如图 1 所示。

1.2 施加温度荷载和约束条件

1.2.1 定义分析类型

本文在对双肢薄壁墩温度场进行分析时,外界温

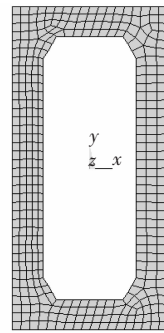


图 1 矩形空心墩网格划分

度、太阳辐射强度等因素都是随时更新的,所以本文选用瞬态温度场对桥墩结构进行分析,其命令流为:ANTYPE,TRANSIENT,NEW^[3]。

1.2.2 施加温度荷载

在 ANSYS 中,用于对实体模型或单元模型进行热分析的温度荷载共有 5 种,即温度、热流密度、对流、热流率以及生热率^[4-5]。对于瞬态热分析,首先要确定初始温度条件。大量实测资料表明,由于在早上 6 点,混凝土结构自身的温度与外界气温非常接近,因此可以看做结构具有均匀的初始温度场,这时候就可利用 IC 命令对初始温度场进行设置。

太阳辐射、热辐射以及对流是双肢墩结构与外界进行热量交换的三种主要方式。其中,利用 SFL 命令将对流荷载施加到双肢墩边界上,就完成了对流荷载的施加。

为了计算的方便,将由太阳辐射引起的热流密度换算到气温中去,因此得到了综合气温的表达式^[6]:

$$T_z = T_a + a_1 I / h \quad (1)$$

式中 T_z ——综合气温(℃);

T_a ——外界气温(℃);

a_1 ——吸收率;

I ——太阳辐射强度(W·m⁻²);

h ——综合热交换系数(W/(m²·℃))。

从上式可以看出,太阳引起的热交换相当于使气温升高了 $a_1 I / h$ ℃。

1.2.3 施加自由度约束

本文采用 DK 命令对关键点施加自由度约束。

1.3 求解设置

1.3.1 时间和时间步设置

本文将 6 点开始时间设为 1e-5,每一个荷载步设置时间为 3 600,即一个小时时间间隔。

1.3.2 荷载步和荷载子步的设置

在非线性分析中,每个荷载步需要设置许多个荷载子步。步长的大小直接影响到计算的精度,步长越

小,计算时间越长,同时计算的精度也就越高。本文采取上午 6:00 到下午 18:00 这个时间段进行分析,在施加温度荷载时,分成 13 个荷载步进行分析。荷载子步根据经验取值,本文按照每个荷载步分成 120 个载荷子步来进行计算。然后使用 Table 数组定义荷载,至于荷载步之间的温度荷载,按线性内插确定。

最后进行输出选项的设置,设置完毕,就可以进行双肢薄壁墩二维温度场的瞬态分析了。

1.4 后处理

ANSYS 针对瞬态热分析的后处理问题提供了通用后处理 POST1 及时间历程后处理 POST26 两种后处理方式。POST1 用于对整个模型在某一荷载步或时间点的结果进行后处理,比如显示某一时刻的温度云图等;POST26 对整个瞬态分析过程的结果进行后处理,另外,还可对变量进行数学操作等^[7-8]。

热分析完成后,可得到各个节点的温度荷载,然后导入桥墩的整体模型,再利用 ANSYS 的耦合分析功能,便可顺利完成双肢墩结构的温度效应仿真分析了。本文在建立桥墩整体模型时,选用了 Beam189 单元,将带有温度信息的各截面定义为 Beam189 单元的自定义梁截面,高墩有限元模型的模拟如图 2 所示。

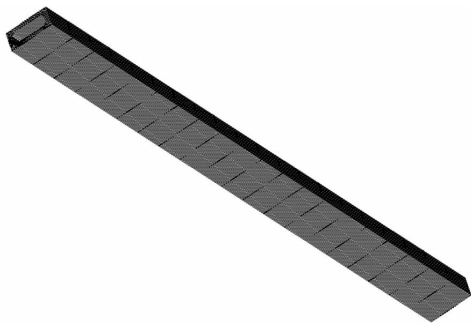


图2 空心墩有限元模型

2 基于 ANSYS 的双肢薄壁墩温差效应分析

2.1 桥梁概况

本文研究的洛水大桥是一座较为典型的高墩大跨预应力混凝土连续刚构桥,地处邢台与冀晋界段的邢汾高速公路,桥墩高 105.09 m,采用的是等截面矩形薄壁空心高墩结构,为典型的薄壁空心高墩。墩壁厚度为 0.7 m,肢间净间距 5 m。该桥所在的地域地形起伏较大,沟底地形平缓开阔,两侧山体较陡,昼夜温差变化较大,而且由于地形地貌等条件的限制,沿墩身各部分接受太阳辐射的时间也不一样,对于墩顶部分一天中接受太阳辐射要多一些,因此,本文主要以距墩顶 5 m 处截面为主要截面进行研究,分析计算截面形状

的改变对双肢墩温度场的影响。

2.2 双肢薄壁墩温差效应 ANSYS 计算结果分析

为了研究日照温差荷载作用下改变双肢薄壁墩的截面形状对温度场的影响,根据以往经验以及相关气象资料提供的近几年邢台冀晋地段的天气情况,采用圆形双肢薄壁墩为对比对象,并且选择了夏季中气温相对较高、太阳辐射强烈、风速较小的晴好天气进行分析。具体日期为 2013 年 8 月 6 日(晴),最高气温 34.5 ℃,最低气温 16 ℃,风速 3 m/s。根据前人研究的经验可知^[9],西侧壁板下午 17:00 时刻温差最大。因此本文以下午 17:00 时刻的温度分布作为控制荷载,对沿墩身高度方向的各个截面进行了温差效应的计算。限于篇幅,以距离墩顶 5 m 处截面为例,悬臂状态下的圆形空心墩以及矩形空心墩在下午 17:00 时刻的温度应力以及变形数据如表 1 所示,应力云图和整体变形云图如图 3~图 6 所示。

表1 距墩顶 5 m 处截面的日照温差应力计算值对比
(悬臂状态)

项目	等效应力/MPa		径向应力 /MPa		最大位移 /cm
	SMX	SMN	SMX	SMN	DMX
圆形空心墩	2.53	7.76×10^{-6}	2.19	-2.53	7.694 5
矩形空心墩	6.27	7.94×10^{-8}	3.21	-6.27	5.678 4

注:1. SMX 为应力最大值,SMN 为应力最小值;2. 正号表示拉应力,负号表示压应力。

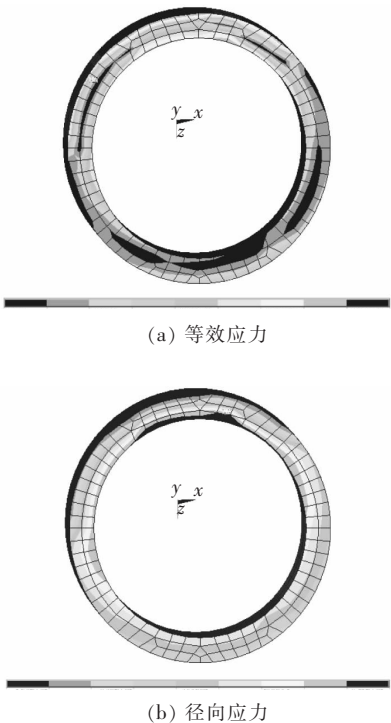


图3 圆形空心墩距墩顶 5 m 处截面温度应力云图

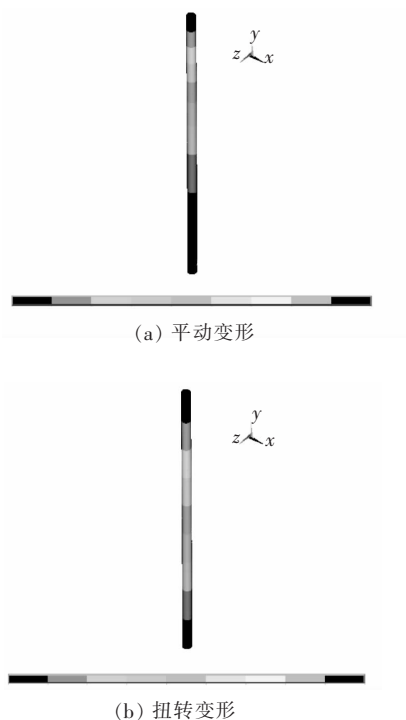


图 4 圆形空心墩整体温度变形位移云图

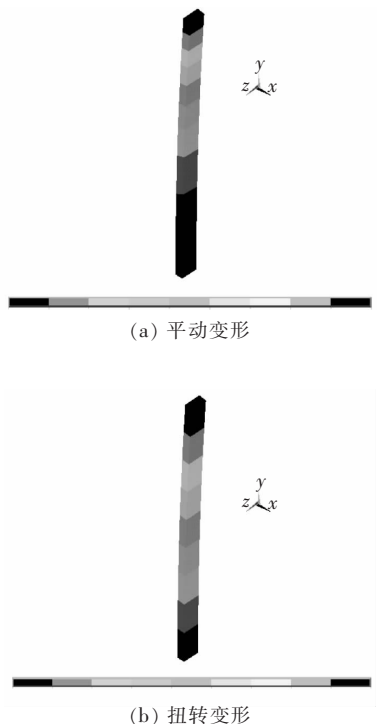


图 6 矩形空心墩整体温度变形位移云图

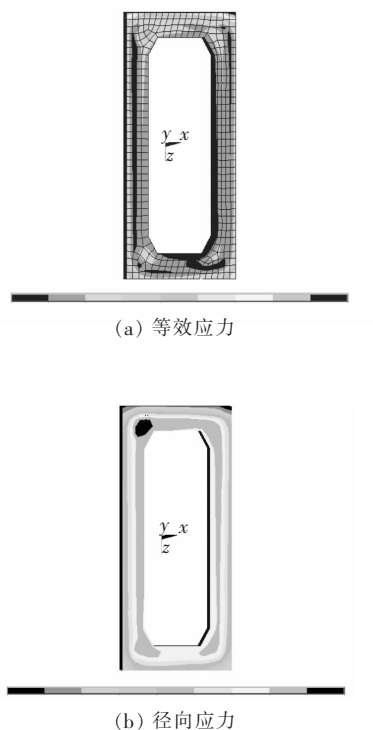


图 5 矩形空心墩距墩顶 5 m 处截面温度应力云图

对上述不同截面形状产生的温差效应的计算结果进行比较分析,得出以下几点结论:

第一,对比表 1 中的数据可知,圆形空心墩的最大应力值都比矩形空心墩的小,而变形值却比矩形空心

墩的大。这主要是因为矩形空心墩的边棱较圆形空心墩多,这些边棱会使空心墩产生较大的应力,却阻碍了空心墩的自由变形。

第二,由图 3 和图 5 可看出,沿着空心墩截面周向方向的应力梯度都较小,而径向方向的应力梯度都较大。等效应力都以拉应力为主,对于圆形空心墩,东、南侧壁板出现了最大拉应力 2.53 MPa,且沿着壁厚方向拉应力逐渐减小,0~0.4 m 范围内应力梯度变化不大,而 0.4~0.7 m 范围内,变化梯度较大;而对于矩形空心墩,东、西侧壁板的拉应力值均较小,南侧壁板的压应力值较大,且最大压应力为 6.27 MPa。径向应力都以内侧壁板受拉,而外侧壁板受压为主,圆形空心墩的最大压应力为 2.53 MPa,最大拉应力为 2.19 MPa,矩形空心墩的最大压应力为 6.27 MPa,最大拉应力为 3.21 MPa。

第三,由图 4 和图 6 可以看出,圆形空心墩结构的最大扭转变形值为 4.871',最大平动变形值为 7.694 5 cm;矩形空心墩结构的最大扭转变形值为 3.623',平动变形最大值为 5.678 4 cm。与矩形空心墩相比,圆形空心墩结构的变形值增大了。且它们的最大变形值均出现在墩顶,由墩顶至墩中再到墩底,结构的变形值逐渐减小,靠近墩底部,结构的变形值为 0。

第四,分析图 5 可知,对于矩形截面,应力最大值出现在角隅处。

3 结论

(1) 利用 ANSYS 的热分析以及耦合分析功能对双肢薄壁墩结构的温度场和温差效应进行了分析计算,快速方便,结果合理,为今后双肢墩结构的设计提供参考。

(2) 悬臂状态下的双肢墩结构,由于截面形状的不同,导致了墩身应力以及变形的差异。截面边棱的增加,使得温度应力增加,但结构的变形减小了。若在实际施工中,为了减小结构的变形,可以把墩身截面由原来的四边形设计成八边形,但此时的应力也就会随着增大。

(3) 日照引起的空心墩温度应力最大值出现在角隅处,此值较大,会对结构的安全性造成隐患。

(4) 在设计空心墩时,要考虑截面形状的影响,采取合理的截面形状对空心墩的安全是有利而无害的,同时也要对空心墩采取合理的配筋设计,有效的避免温度应力对墩身结构造成破坏。

参考文献:

- [1] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析[M]. 北京:人民交通出版社,1991.
Liu Xingfa. Temperature Stress Analysis of Concrete Structures[M]. Beijing: China Communications Press, 1991.
- [2] 刘兴法. 混凝土桥梁温度分布[J]. 铁道工程学报,1985(1):107-111.
Liu Xingfa. Temperature Distribution in Concrete Bridges[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1985(1):107-111.
- [3] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
Wang Xinmin. Numerical ANSYS Structural Engineering Analysis [M]. Beijing: China

Communications Press,2007.

- [4] 曹少辉,习勇,田仲初. 薄壁空心高墩的温度场测试及数值分析[J]. 中南林业科技大学学报,2010(12):194-198.
Cao Shaohui, Xi Yong, Tian Zhongchu. Test and Numerical Analysis of Thin-walled Hollow High Pier Temperature[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2010(12):194-198.
- [5] 唐兴伦,范群波,张朝晖,等. ANSYS 工程应用教程—热与电磁学篇[M]. 北京:中国铁道出版社,2003.
Tang Xinglun, Fan Qunbo, Zhang Chaohui, etc. ANSYS Engineering Application Tutorial—Heat and Electromagnetics Papers [M]. Beijing: China Railway Publishing House,2003.
- [6] 葛俊颖,丁啸宇,张耀东. 预应力混凝土箱梁桥日照温度效应计算软件的编制[J]. 公路,2010(3):82-86.
Ge Junying, Ding Xiaoyu, Zhang Yaodong. Preparation of Prestressed Concrete Box Girder Bridge Sunshine Temperature Effect Calculation Software [J]. Highway,2010(3):82-86.
- [7] 龚曙光,黄云清. 有限元分析与 ANSYS APDL 编程及高级应用[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
Gong Shuguang, Huang Yunqing. Finite Element Analysis and ANSYS APDL Programming and Advanced Applications [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [8] 龚曙光,谢桂兰,黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
Gong Shuguang, Xie Guilin, Huang Yunqing. ANSYS Parametric Programming and Command Reference [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [9] 周姐姐. 薄壁空心高墩温度效应仿真分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2013.
Zhou Niuniu. Thin-walled Hollow High Pier Temperature Effect Simulation Analysis [D]. Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University,2013.

(上接第15页 From P.15)

- Li Changning, Wang Binglong, Zhou Shunhua. Reinforcement Technique for Subgrade in Soft Soil Zone by Composite Structure of CFG Pile-net and Its Application[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(1):27-31.
- [9] 铁道第四勘察设计院. 软土地基沉降估算方法及不同地基处理方法加固效果研究报告[R]. 武汉:铁道第四勘察设计院,2005.
The Fourth Survey and Design Institute of China Railway. Report of Methods of Settlement Calculation

and Effect by Different Soft Soil Ground Treatment [R]. Wuhan: The Fourth Survey and Design Institute of China Railway,2005.

- [10] 铁道第四勘察设计院. 软土地基综合勘探精度及物理力学参数选取方法研究[R]. 武汉:铁道第四勘察设计院,2005.
The Fourth Survey and Design Institute of China Railway. Research of Precision of Comprehensive Prospecting and Selection of Physical and Mechanics Parameters [R]. Wuhan: The Fourth Survey and Design Institute of China Railway,2005.