2014年12月 JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE)

Dec. 2014

# 双肢薄壁墩温度效应仿真分析

张运波 , 蔡亭亭

(石家庄铁道大学 土木工程学院 ,河北 石家庄 050043)

摘要: 在日照温度分布理论以及有限元分析方法的基础上 利用 ANSYS 的二次开发功能 编制了双肢矩形薄壁空心墩结构的温度场和温差效应分析的专用程序 ,并结合实例验证了仿真分析的准确性。同时以某高墩大跨连续刚构桥的双肢薄壁墩为研究对象 ,利用二次开发成果 ,对双肢矩形薄壁空心墩在日照温度荷载作用下的温度效应进行了分析 ,得出了双肢薄壁墩结构在悬臂状态与铰支状态两种不同的工况下 桥墩的温度应力与整体变形。结论可以为双肢薄壁墩的设计和施工提供参考。

关键词: 双肢薄壁墩; 温度场; 温差效应; 二次开发; 仿真分析

中图分类号: U441.5 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 0373(2014) 04 - 0024 - 07

### 0 引言

近几年 我国的交通事业取得了突飞猛进的成果 桥墩结构也不断地由原来的小跨径、实体墩、重型结构向轻型、薄壁、大跨径方向发展。随着对路线指标、造价和路线环境要求的日趋提高 高墩大跨连续刚构桥的应用已经屡见不鲜 ,目前双肢薄壁墩结构凭借着自身独具的优点 ,渐渐取代了单肢墩。它不仅能增加桥梁的刚度 ,允许桥梁纵向有较大的变位 ,而且两肢墩之间负弯矩为下凹的曲线 ,这样既减小了墩顶截面尺寸 ,又能充分发挥材料的受力性能 增加了桥梁美感。

桥梁结构长期暴露于自然环境中,受到太阳辐射、大气骤然降温和年温变化的影响,再加上混凝土自身导热性能差的特点[1]。使得结构物内外表面产生较大的温差,当由此温差产生的变形受到约束时,就会产生温度应力,从而使桥墩发生弯曲变形。根据理论实践证明[2],此温度应力有时与荷载产生的应力属于同一个数量级,甚至引起桥墩结构的开裂。影响墩身结构的稳定性。在目前的规范中,对桥梁上部结构的温度规定很多,而对于下部结构很少[3]。由以下的计算也可以看出,在悬臂状态下的墩顶位移很大,当两端都受到约束时,即在铰支状态下的温度应力值也很大,这种温度应力达到一定值的时候,会使桥墩产生纵向裂缝。因此,对双肢薄壁空心墩结构进行温度效应的仿真分析具有必要性和紧迫性。

在前人研究的基础上 利用 ANSYS 的二次开发功能 编制了适合于计算双肢薄壁墩结构的有限元程序。以邢汾高速公路洺水大桥 105.09 m 高的双肢矩形薄壁空心墩为研究对象 利用编制的程序计算它的温度场和温度应力(悬臂状态) 并与实际数据进行对比 其数值相差不大 证明了二次开发成果的实用性。同时利用二次开发成果 对实际的双肢矩形薄壁空心墩进行温度场的模拟 得出了在悬臂状态下的墩顶位移比两端固定状态下的位移要大很多 因此有必要对日照作用下的墩顶位移进行施工控制。

### 1 双肢薄壁墩日照作用下的温度场计算

日照作用下的温度场需要同时考虑太阳辐射、桥墩各部分与外界之间的辐射换热(长波辐射)以及对流换热的影响。通过采用太阳辐射理论计算公式,并利用 ANSYS 的热分析和二次开发功能,编制了内嵌于 ANSYS 的集温度场计算和温度效应于一身的命令流[4-5],使双肢薄壁墩结构的温度场仿真分析更简便。

DOI: 10. 13319/j. cnki. sjztddxxbzrb. 2014. 04. 05

收稿日期: 2014 - 06 - 22

作者简介: 张运波 男 1971 年出生 副教授

### 1.1 太阳辐射

太阳辐射穿过地球大气层达到地面的辐射由于受大气分子、水蒸气、气溶胶等的散射和吸收而衰减,被大气散射的辐射有一部分到达地面,同时,到达地面的直接辐射和散射又被地面反射,因此,太阳辐射包括太阳直接辐射、大气散射和地面反射三部分[6]。下面对这三部分的理论计算公式进行说明。

#### 1.1.1 太阳直接辐射

太阳直接辐射一年内有微小波动,可近似按下述公式计算[7]

$$I = 1\ 367(1 + 0.033\cos\frac{360^{\circ}n}{365}) \tag{1}$$

式中, n表示自1月1日起算的日序数。

当太阳射线垂直于地面时的太阳直接辐射强度的近似计算公式为

$$I_m = 0.9^{mt_u}I \tag{2}$$

式中 ,m 为经大气修正的大气光学质量;  $t_u$  为大气浑浊度因子 在晴朗洁净的大气状态下取值  $1.8\sim3.3$ 。 1.1.2 太阳散射

天空散射是从天穹的各个方向辐射到地面上的太阳辐射强度 ,主要是大气对太阳直接辐射的散射和 反射形成的。它与结构物壁面的方位角、是否处于阴影状态无关 ,主要和大气的浑浊程度、壁面的倾角  $\beta$  和太阳高度角有关。水平面上的散射强度

$$I_d = (0.271I - 0.294I_m) \sin \beta_s \tag{3}$$

式中  $\beta$ 。为太阳高度角。

任意壁面的散射强度

$$I_{\beta} = I_d (1 + \cos \beta) / 2 \tag{4}$$

#### 1.1.3 地面反射

太阳直接辐射和太阳散射到达地面时,一部分被地面反射,这种反射是一种短波辐射。对于结构物任意倾斜的接受面,反射辐射强度

$$I_f = v(I_m + I_d) (1 - \cos \beta) / 2$$
(5)

式中,v为地面反射系数,一般取0.2。

#### 1.2 热辐射(长波辐射)

混凝土的表面通过电磁波的形式向外界发射能量,同时吸收来自大气及周围环境的辐射,从而形成了混凝土的辐射热交换过程。这种辐射热交换的热流密度

$$q = \varepsilon_a C_0 \left[ (273 + T_a)^4 - \varepsilon_d (273 + T_d)^4 \right]$$
 (6)

式中 , $C_0$  为 Stefan-Boltzmann 常数 其值为 5.67 ×  $10^{-8}$  ( W/m² • K⁴) ;  $\varepsilon_a$  表示混凝土表面辐射率 ,一般其值 取 0.88;  $\varepsilon_d$  表示大气的辐射率 ,一般取值  $\varepsilon_d$  = 1 - 0.261 exp [-7.776 ×  $10^{-4}$   $T_d$ ²]。

### 1.3 对流换热

对流换热是指由于固体表面与其接触的流体之间存在的温差而引起的热量交换。对流换热热流密度主要与接触面的性质、大小、流体速度、流动空间以及流体与接触面间的温度有关。根据牛顿公式,热流密度  $q_t$  与接触面面积和温差成正比,即

$$q_r = h_f(T_a - T_d) \tag{7}$$

式中, $T_a$ 表示固体表面的温度;  $T_d$ 表示周围流体的温度;  $h_f$  为对流换热系数,与物体表面的光洁度和几何形状、风速等因素有关,通常由试验来确定。

### 2 内嵌干 ANSYS 的程序界面二次开发成果

在用 ANSYS 进行求解时 将太阳辐射、辐射换热和对流换热统一转换为热流密度 以 TABLE 表示 ,然后再施加到边界上。边界条件的气温、太阳辐射和风速都是时间的已知函数 ,那么热流密度总可以表示成时间和表面温度的函数。因此 ,可以给定 fluxl 在不同时间和表面温度下的值 ,定义一个随表面温度和时间变化的热流密度数表。然后用 SFL 命令对桥墩施加边界条件。因为定义 fluxl 时已经确定 fluxl 是随

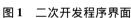
温度和时间变化的 因此在瞬态求解时 ANSYS 就会根据温度和时间从 fluxl 表格中提取热流密度的值。

选用 Beam189 单元进行分析,通过热-结构耦合功能,将温度场单元 PLANE77 转化为结构场单元 PLANE82 同时截面上的温度值通过材料号转换过来。将带有温度信息的截面定义为 BEAM189 单元的截面,从而可以计算桥墩结构的日照温度效应。

修改和编写用户界面是通过用 UIDL 语言修改以. GRN 为扩展名的控制文件。TCL/TK 是一套脚本语言,可以调用 ANSYS 数据库,以实现与 ANSYS 的数据交换,比 UIDL 功能更强大,但必须经 UIDL 和 APDL 调用。本文通过在控制文件 UIMENU. GRN 和 UIFUNC2. GRN 中修改编制的自定义菜单代码及对话框代码,用 UIDL 实现了在 ANSYS 程序的 Main Menu 菜单中修改及添加自定义的菜单  $^{[5\ 8-9]}$ ,用 TCL/TK 实现了对话框的编制。修改后的 ANSYS 界面如图  $1\ fmm$ 。

要实现从建模到分析再到求解的全过程 必须对 Main Menu 菜单中的各个新增加的菜单进行命令流的链接 即用 APDL 语言编写命令流。比如: 如图 1, "空心矩形截面平面模型导入"所链接的命令流就是 "piermodel. ans" 10 。用 TCL/TK 编写的用于输入热分析参数数据的对话框如图 2 所示。





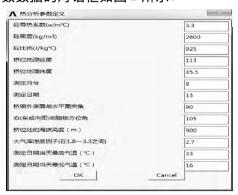


图 2 热分析参数对话框

### 3 双肢薄壁墩温度场实例验证及温差效应分析

#### 3.1 桥梁概况

研究的洺水大桥处于温带大陆性季风气候,其四季分明、寒暑悬殊、春旱风大、夏热多雨、秋凉时短、冬寒少雪。年平均气温 13.5  $^{\circ}$  极端最低气温 -22.4  $^{\circ}$  极端最高气温 41.8  $^{\circ}$  。年日照 2.523 h,年平均风速  $1.4 \sim 1.9$  m/s。最大风速 21 m/s。现主要针对 5 6 号墩身结构进行研究: 桥墩高 105.09 m,采用双肢等截面矩形薄壁空心墩结构,两肢间的净距为 5 m 壁厚 0.7 m。为典型的双肢薄壁空心墩 桥墩布置如图 3 。桥墩周围的地貌属于剥蚀中低山地貌,地面标高一般为  $814.00 \sim 960.00$  m,地形起伏较大,两侧山体较陡。沟底地形较平坦开阔,所以受太阳辐射较为均匀,可近似看做太阳射线平行的照射到墩身结构。

#### 3.2 双肢矩形空心墩温度场实例验证

为了验证二次开发成果 "双肢薄壁墩温度应力分析系统"的准确性和实用性 ,针对洺水桥这一双肢等截面矩形空心墩结构进行了温度应力的分析 [11-42]。 距离墩顶 5 m 处截面的有限元模型如图 5 所示。温度测定日期为 2013 年 8 月 13 号 ,当地 10:00 ,12:00 ,15:00 ,17:00 的温度分布云图如图 6 所示。表 1 和表 2 也分别列出了向阳侧一点不同时刻温度场以及沿壁厚 0 m  $\rho$ . 2 m  $\rho$ . 4 m  $\rho$ . 6 m 方向的温度分布。

表 1 向阳侧一点不同时刻温度计算值与实测值				
时间	计算值	实测值	差值	
0:00	24.314	23.422	0.892	
10:00	22.268	23. 231	0.963	
12:00	27.721	27.947	0.226	
15:00	34.078	35.076	0.998	
17:00	37.926	36.924	1.002	

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

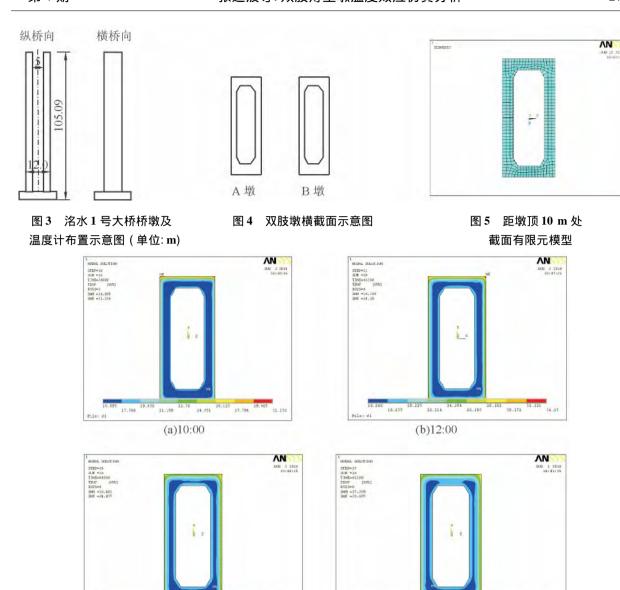


图 6 距墩顶 10 m 处截面不同时刻温度场

(d)17:00

 $^{\circ}$ C

表 2 向阳壁板 12:00 沿壁厚方向温度数据计算值与实测值

距离外壁板距离/m	计算值	实测值	差值
0	31.997	30.254	1.743
0.2	20. 145	19.924	0.221
0.4	16.432	16.097	0.335
0.6	14.692	14.543	0.149

由表 1 可看出 最高温差为下午 17 点 ,为 1.002  $^{\circ}$  符合规范要求。由表 2 也可以看出 ,沿壁厚方向温度分布的走势也基本一致 ,由此可以验证二次开发成果的准确性 ,为后面温度应力计算奠定了基础。

### 3.3 双肢薄壁墩温度效应计算结果分析

19-254

(c)15:00

为了研究双肢薄壁墩结构的温差效应,对洺水1号大桥进行了观测,研究发现,由于两肢墩的净间距为5m,相互之间基本上没有遮挡,也就是说两肢墩之间互相没有影响,为了说明这一点,下面给出了双肢墩温度场模拟,如图7所示。

从图 7 中也可以看出 ,两个墩的温度场分布基本一致 ,因此可以单独研究一根墩 ,作为双肢墩变化的结果。选择在 2013 年 8 月 13 号对洺水桥进行分析 ,属于夏季中气温较高的一天 ,太阳辐射强烈 ,风速也

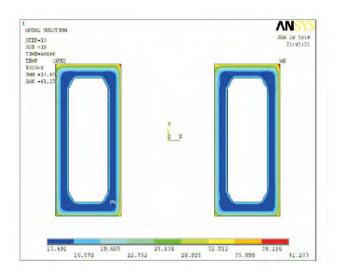
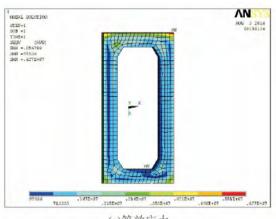
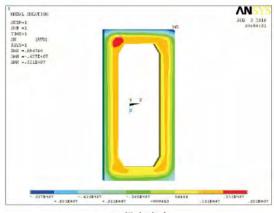


图 7 双肢墩温度场模拟

小 桥墩处于最不利状态。具体情况为: 最低气温 18 ℃ 最高气温 32 ℃ 风速 2 m/s。由文献 [4]可知 下 午 17:00 时的温差最大 因此本文以 17:00 时距离墩顶 5 m 处截面分析 在悬臂状态下的温度应力云图和 桥墩整体变形图如图 8 和图 9。在铰支状态下的温度应力云图和桥墩整体变形图如图 10 和图 11。

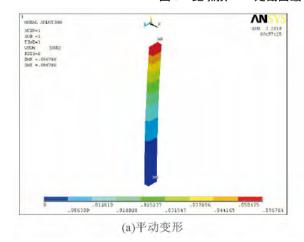


(a)等效应力



(b)径向应力

距墩顶 5 m 处截面最不利时刻应力云图(悬臂状态)



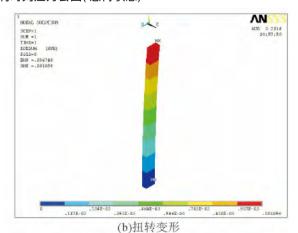
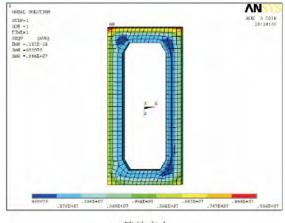
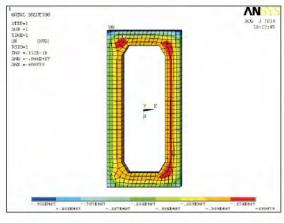


图 9 双肢薄壁墩结构整体变形位移云图(悬臂状态)

对上述温差效应计算结果进行分析,可以得出以下几点结论:

(1) 由图 8(a) 和图 10(a) 可知 截面的最大应力在角隅处出现 且墩顶截面在悬臂状态下的最大应力

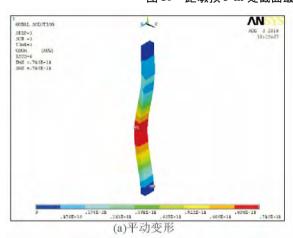




(a)等效应力

(b)径向应力

图 10 距墩顶 5 m 处截面最不利时刻应力云图(铰支状态)



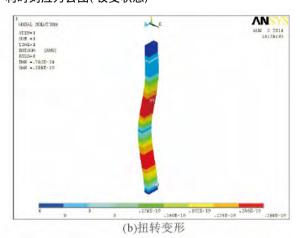


图 11 双肢薄壁墩结构整体变形位移云图( 铰支状态)

为 6.27 MPa ,而在铰支状态下的最大应力达到了 9.66 MPa。

- (2) 由图 8 可知 在悬臂状态下,截面的等效应力由向阳面向背阳面逐渐增大,且增大的梯度也较大,最大应力集中在角隅处,为 6.27 MPa。径向应力背阳面主要以压应力为主,且沿墩壁厚度由外向内,压应力呈梯度变化-逐渐减小,在靠近墩壁内侧,压应力已变为拉应力,但此处的拉应力值较小。向阳面主要是拉应力为主,但拉应力值相对较小,且变化不大,最大拉应力集中在角隅处,为 3.21 MPa。
- (3) 由图 10 可知,在较支状态下,截面的等效应力主要以拉应力为主,且向阳面的拉应力几乎为零; 背阳面的拉应力,沿墩壁厚度由内向外,拉应力值呈梯度逐渐增大,最大值集中在角隅处,为 9.66 MPa。截面的径向应力主要以压应力为主,向阳面的压应力值很小,大部分区域还是以很小的拉应力为主; 背阳面沿墩壁厚度由内向外,压应力值呈梯度逐渐增大,最大值集中在角隅处,值为 9.66 MPa。
- (4) 由图 9 可知 在悬臂状态下 结构的平动变形最大值和扭转变形最大值均出现在墩顶 平动变形最大值为  $5.678~4~\mathrm{cm}$  最大扭转变形值约为 3.623 ,且由墩顶至墩中再到墩底 结构的变形逐渐减小 靠近墩底部 结构的变形值为 0 。
- (5) 由图 11 可以看出 在铰支状态下 结构的平动变形最大值和扭转变形最大值均出现在墩中附近 , 平动变形最大值为  $78.3 \times 10^{-18}$  cm ,最大扭转变形值为(  $0.99 \times 10^{-16}$ ) ′,平动变形和扭转变形均较小 ,且 由墩中向墩顶和墩底均逐渐减小 ,靠近墩顶部和墩底部 ,变形值为 0。

### 4 结论

(1) 利用 ANSYS 的二次开发功能,开发出适合于自己的程序,方便计算与研究,可为双肢墩的温度应

#### 力分析提供参考。

- (2) 双肢薄壁墩结构无论在悬臂状态还是铰支状态,都会产生很大的应力,特别是在悬臂状态下,墩顶产生较大的位移,通过对墩顶的约束,可以减小墩顶位移,但是应力值会增大,因此需要在对双肢薄壁墩进行设计时,采取合理的配筋设计,以防裂缝的发生。
- (3)日照引起的空心墩的温度应力主要集中在角隅处 因此需要对应力集中处采取必要的措施 防患于未然。
- (4) 文中桥墩之间的距离比较远,日照的方向变化并未影响按单肢墩计算的结果,但是两墩之间距离比较近时,两墩之间的相互影响没有考虑,因此,还有必要对两墩之间距离对太阳辐射公式的影响进行研究,用以精确的计算日照温度场对桥墩的影响。

## 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.
- [2] 蒋国富. 大跨径桥梁高墩日照温度效应的研究[D]. 西安: 长安大学公路学院 2005.
- [3]潘永杰. 混凝土桥梁温度场仿真分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学 2007.
- [4]周妞妞. 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.
- [5]葛俊颖 ,丁啸宇 涨耀东. 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.
- [6]凯尔别克. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 刘兴法,译. 北京: 中国铁道出版社,1981.
- [7]彭友松 强士中 李松. 哑铃形钢管混凝土拱日照温度分布研究[J]. 中国铁道科学 2006 27(5):71-75.
- [8]张建业 杨甫勤 钱继锋. 基于 APDL 和 UIDL 的 ANSYS 二次开发技术及其应用 [J]. 中国制造业信息化 2006 35(23): 79-81.
- [9]程 铭、吴志军、冯平法. 基于 UIDL 的 ANSYS 用户菜单定制技术 [J]. 机械制造. 2006 506(44): 44-46.
- [10] 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.
- [11] 陈建平 戴桂华 李德建. 酉水大桥日照温度对斜交高墩施工线形影响及其控制方法研究 [J]. 公路工程 2013(10):13-18.
- [12]胡立华 李德建 陈建平 筹. 酉水大桥大跨度连续箱梁桥斜交高墩日照温度效应分析 [J]. 铁道科学与工程学报 2013, 10(2):23-29.

# Simulation of Temperature Effects on Double-limb Thin-Wall Pier

### Zhang Yunbo, Cai Tingting

( School of Civil Engineering Shijiazhuang Tiedao University Shijiazhuang 050043 ,China)

Abstract: This paper provides the prestressed concrete box girder continuous steel of MingShui bridge of XingFen High Way( 80 m + 3 × 150 m + 80 m) as the engineering background , introduces sunshine temperature distribution theory and finite element analysis method of the double-limb thin pier. The ANSYS secondary development function , which is used to establish the analysis program for effects of temperature and temperature difference for the double limb pier with rectangular thin-walled hollow , and verifies the accuracy of the simulation analysis with examples. Using the ANSYS secondary development results , this paper analyses the temperature effects under the loads of sunshine temperature of the double limb pier with rectangular thin-walled hollow , and obtains the temperature stress and overall deformation of the pier in the different conditions-cantilever state and hinged status. This paper may provide reference for the ANSYS secondary development and the temperature control of the double limbs of thin-walled pier.

**Key words**: double-limb thin-Wall pier; temperature field; temperature effect; secondary development; simulated analysis

(责任编辑 车轩玉)