

高海拔地区薄壁空心高墩日照温度效应

刘诚诚¹, 黄永杰², 张根思², 刘武昊³, 刘成², 张永水^{1*}

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 中交基础设施养护集团有限公司; 3. 青海省公路管理局)

摘要:高海拔地区具有气温低、昼夜温差大、太阳辐射强的特点,薄壁空心高墩受日照辐射和空气温度影响较大。为合理指导施工,必须研究高墩在日照温度下的温度场和温度效应。依据热交换理论,基于现场实测温度,利用有限元 Ansys 软件,分析了薄壁空心高墩一天中温度变化和温度效应,得到了薄壁空心高墩温度场特性和温度引起的应力、位移分布规律,可为高海拔地区薄壁空心高墩的设计和施工提出合理化建议。

关键词:日照温度;有限元分析;温度场;温度效应

高海拔地区具有气温低、昼夜温差大、太阳辐射强的特点,薄壁空心高墩受日照辐射和空气温度影响较大。薄壁空心高墩由于四周和内外表面温度的不均匀分布,容易引起较大的偏位和应力。基于温差研究表明:当空心高墩内外气温温差达 2~3℃时,桥墩内外壁温差可能会超过 15℃。基于偏位的研究表明:当四周外壁温差达 7℃时,温差产生的偏位达到 5 cm 以上,超过规范允许的轴线偏位值。有文献表明温度引起的应力应变值甚至达到了和活载一样的数量级,因此不能忽略温度对高墩的影响。在施工过程中,除了考虑高墩施工工艺产生的误差外,还需考虑由日照温度对桥墩偏位的影响,对施工段进行相应的调整,保证墩身的垂直度。同时通过合理布置防裂钢筋或采取相应的温控措施,防止墩身开裂。

为研究施工过程中,日照对桥墩的影响,以现场试验数据为依据,分析日照温度对墩体温度的影响,计算由此产生的温度应力和温度变形。为墩身裂缝防治以及墩身垂直度控制提供建议,以保证墩身施工质量。

1 热交换理论

墩身温度场随外界温度和日照辐射的变化而变化。热交换具体计算如下。

太阳直接辐射热流密度:

$$J_0 = 1\,367 \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360^\circ N}{365} \right) \right] \quad (1)$$

$$q_{sdi} = J_0 \cdot P \cos \left(\frac{\pi}{2} + h - \beta \right) \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_w) \quad (2)$$

式中: J_0 为太阳常数,表示太阳辐射在单位时间内投射到地球大气层上界并垂直于太阳射线的单位面积上的能量; N 为自1月1日起的日序数; P 为大气透明度系数,由林克氏浑浊度系数和相对大气压决定; h 为太阳高度角; β 为壁面与水平面的夹角; α_s 为太阳方位角; α_w 为壁面方位角。

天空散射:

$$q_{sdf} = (0.271 - 0.293\,9 \cdot P) J_0 \sinh \cdot \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (3)$$

地面短波反射:

$$q_{sr} = r_s (q_{sdi} + q_{sdf}) \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (4)$$

式中: r_s 为地表短波反射系数。

任何物质都可以释放并吸收长波辐射:

$$q_r = C_s \epsilon [\epsilon_{ah} (T_a + 273)^4 - (T + 273)^4] \quad (5)$$

式中: ϵ_{ah} 为反映大气长波辐射与地面长波辐射综合辐射效应的系数,可取为 1.0; C_s 为斯特番-波尔兹曼常数; ϵ 为混凝土表面辐射率; T_a 为气温; T 为边界温度。

空气与墩表面之间存在温度差,会在边界处产生对流换热,壁面与大气对流换热的热流密度为:

$$q_c = h' [T_a - T] \quad (6)$$

式中: h' 为对流换热系数,可以采用经验公式计算:

$$h = 2.6 \left[\sqrt[4]{T_a - T} + 1.54V \right] \quad (7)$$

式中: V 为风速(m/s)。

收稿日期:2020-11-28(修改稿)

基金项目:青海省科学技术厅应用基础项目(编号:2016-ZJ-727)

作者简介:刘诚诚,男,硕士研究生。E-mail:839127974@qq.com

* 通信作者:张永水,男,博士,教授。E-mail:864350071@qq.com

2 现场温度测试

以青海省 G310 大循高速公路上卧龙沟 4 号大桥为研究背景。该桥最高桥墩为 6# 桥墩,高 104 m。外表面由墩底 8.06 m×6.56 m 渐变到墩顶 5.50 m×4.00 m,横桥向壁厚 0.85 m,纵桥向壁厚 0.80 m。

为测得卧龙沟 4 号桥 6# 墩沿壁厚方向的温度场,选取桥墩高 30 m 和墩高 90 m 处作为测试截面,截面上埋置混凝土温度传感器进行量测。每个截面共布置 12 个温度测点,温度测点布置见图 1。并在墩内、外表面上各自安装一个空气温度计,用于测量空气温度,2016 年 8 月 8 号所测空气温度见表 1。

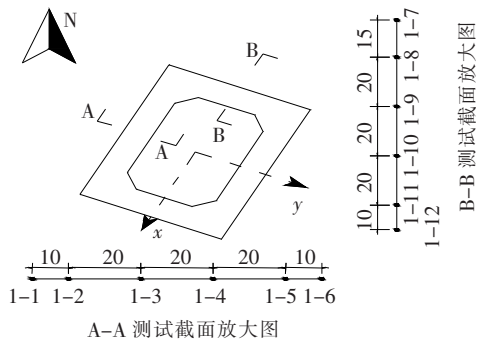


图 1 桥墩布置走向及表面温度测量布置图

(图中 x 方向为横桥向, y 方向为纵桥向,1-1 为 A-A 截面外表面,1-7 为 B-B 截面外表面,单位:cm)

表 1 6# 墩内外表面空气温度实测值(2016 年 8 月 8 日)		
时刻	外表面温度/℃	内表面温度/℃
06:00	18.2	18.2
07:00	19.3	18.4
08:00	21.6	18.8
09:00	24.4	19.1
10:00	27.6	19.5
11:00	30.4	19.9
12:00	32.7	20.3
13:00	33.8	20.6
14:00	34.0	20.8
15:00	33.5	20.9
16:00	32.5	21.0
17:00	31.0	20.9
18:00	29.3	20.8
19:00	27.3	20.6
20:00	26.1	20.2

3 日照温度场分析

3.1 模型分析参数

以卧龙沟 4 号 6# 墩为计算模型,仅考虑桥墩架设过程,还未架设上部结构,分析 2016 年 8 月 8 号的温度。根据实测结果分析,桥墩温度和墩高无关。桥墩外表面热交换包含热辐射和热对流,风速取 1 m/s。内表面热交换包括长波辐射和热对流,风速取 0 m/s。不考虑内外气流交换。内外空气温度取实测值。表 2 为具体参数取值。

表 2 墩身温度分析关键参数表

序号	参数	单位	数值
1	混凝土导热系数	W/(m·K)	2.5
2	比热容	J/(kg·K)	960
3	密度	kg/m ³	2 600
4	桥梁经纬度		102.5N 35.8E
5	桥轴线方位角		SE115°
6	风速	m/s	1
7	混凝土表面太阳辐射吸收率		0.65
8	地表反射系数		0.2
9	线膨胀系数	1/℃	1×10 ⁻⁵
10	混凝土弹性模量	MPa	3.25×10 ⁶
11	混凝土长波发射率		0.9
12	Stenfan-Boltzman 常数	W/(m ² ·K ⁴)	5.67×10 ⁻⁸

由于对流换热和长波辐射交换都受表面固体温度和表面空气温度的影响,因此采用综合换热系数表征其综合效果,公式为:

$$h_z = \frac{q_c + q_r}{T_a - T} \tag{8}$$

对于外表面,因太阳辐射与表面温度无关,不影响综合系数,故以综合系数将太阳辐射的热流换算到周围的空气中,为综合空气温度。

$$T_{sa} = T_a + A_s q_{sdi} / h_z \tag{9}$$

式中: T_{sa} 为综合空气温度; T_a 为外界温度; A_s 为混凝土吸收率。

内表面不考虑太阳辐射, $T_{sa} = T_a$ 。

3.2 温度场分析

采用 Ansys17.0 中的 Ansys/Multiphysics 模块分析桥墩温度的变化。

首先建立墩模型。单元采用三维实体单元 Soild70 进行分析,生成实体模型,扫略(Sweep)划分网格。

然后求解。定义初始环境温度为 18.2℃。采用瞬态分析。荷载采用热对流加载,空气温度由测得的空气温度数组按时间插值所得,按式(8)、(9)计算出综合交换系数、综合空气温度。

表 3 和图 2 为 90 m 处各测点的温度计算值与实测值。

表 3 东北侧外表面和西北侧外表面测点温度变化

测点	时刻	计算值/℃	实测值/℃
西北方向 外表面	06:00	18.208	18.6
	08:00	18.843	18.9
	10:00	20.403	21.3
	12:00	22.427	23.8
	14:00	24.604	27.1
	16:00	31.891	33.3
	18:00	40.880	41.5
	20:00	39.198	38.6
	06:00	18.305	19.5
	08:00	24.328	25.8
东北方向 外表面	10:00	27.692	28.7
	12:00	27.311	26.5
	14:00	26.543	26.6
	16:00	26.729	27.4
	18:00	26.399	26.9
	20:00	25.425	26.2

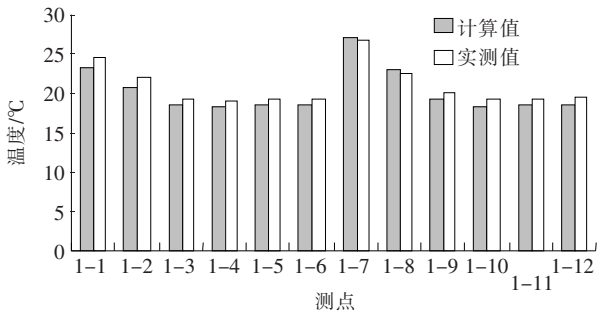


图 2 13:00 时刻不同测点的温度值

由表 3 可知:从时间和空间上,证明空心墩计算值和实测值比较吻合,变化规律基本一致。说明温度场计算模型正确可信。图 2 表明:受日照温度和辐射影响较大的范围位于距桥墩外表面 50 cm 以内。

4 温度效应分析

4.1 温度应力分析

在已验证的温度场分析模型基础上,将温度单元转化为对应的结构单元,写入结构属性,施加一端固结

一端自由的边界条件,墩只承受温度荷载,按荷载步加载温度计算结果。求得墩应力变化和位移变化。取计算结果的典型时刻 12:48 墩顶单元,计算结果如图 3~5 所示。

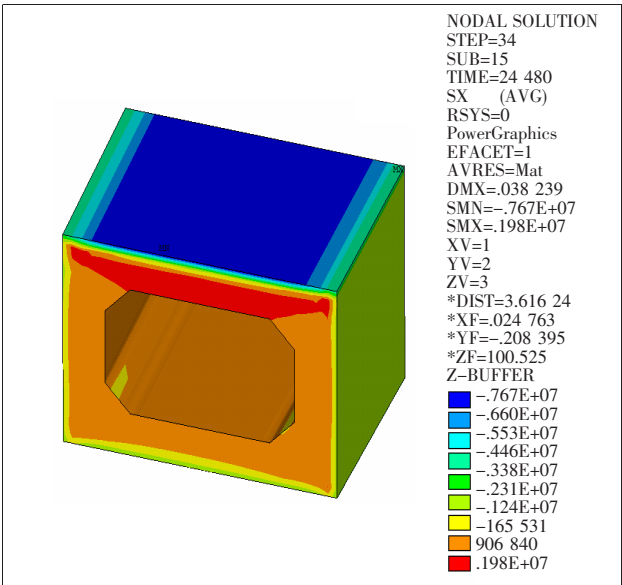


图 3 墩顶单元横桥向应力云图(单位:Pa)

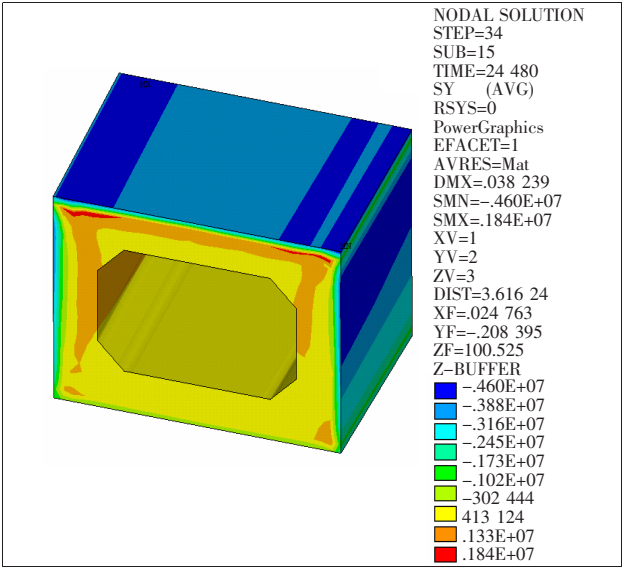


图 4 墩顶单元纵桥向应力云图(单位:Pa)

由图 3~5 可知:混凝土 3 个方向的最大拉应力分别为 $\sigma_x=1.98$ 、 $\sigma_y=1.84$ 、 $\sigma_z=1.54$ MPa。空心墩混凝土的抗拉强度标准值为 2.39 MPa,抗拉强度设计值为 1.71 MPa。考虑桥墩在施工过程中主要受竖向重力,且最不利位置位于墩顶处,重力产生的应力对 x 、 y 方向拉应力的影响不大,故按最大拉应力理论,应力值大于混凝土抗拉强度设计值,施工中,桥墩混凝土可能产生开裂。

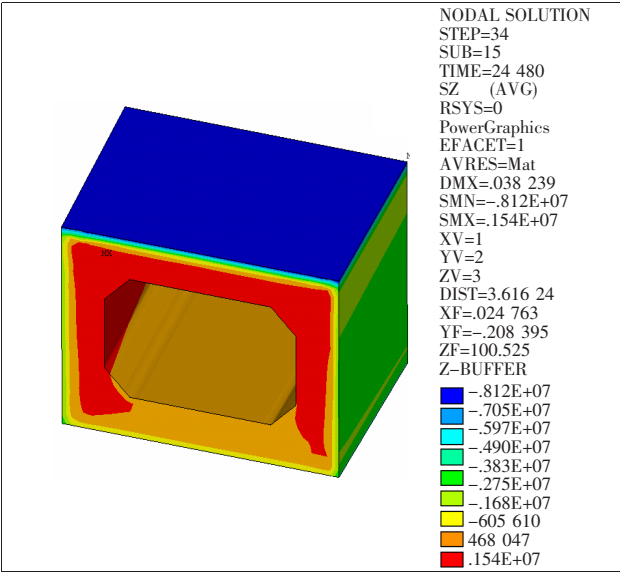


图5 墩顶单元竖向应力云图(单位:Pa)

4.2 位移偏位分析

分析日照温度对墩顶偏位的影响。最大轴线偏位见表4。

表4 104 m墩顶偏位

时刻	偏位情况	数值/mm
10:24	x轴最大	7.8
19:00	x轴最小	-10.2
19:48	y轴最大	4.7
12:36	y轴最小	-31.1

假设日照辐射、天气温度没有变化,仅分析墩高对偏位的影响。共分析墩高为30、50、70、80、90、104 m等情况。将得出的数据进行插值,结果见图6。

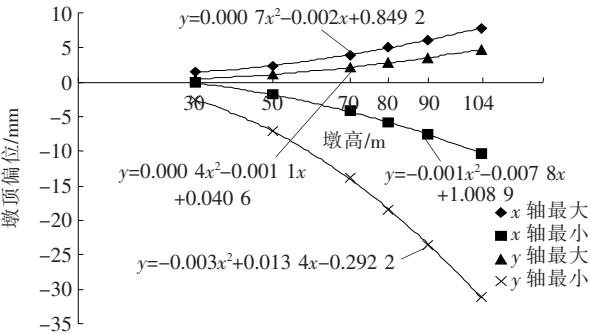


图6 墩高与墩顶偏位关系图

位移 $\Delta x = \alpha \frac{\Delta t}{h} \int M ds$, 故墩高和轴线偏位呈二次关系。从图6可知:当墩高达到50 m时,墩顶偏位达到10 mm。以最不利的“y轴最小”偏位考虑,从安全角度出发,当墩高超过50 m时,施工需采取纠偏措施。

5 结论

(1) 高墩温度场主要影响因素为大气温度和太阳辐射。而高墩朝向对墩外表面所受辐射大小有影响。桥墩的温度滞后于空气温度。由于日照辐射,桥墩最大温度高于空气的最大温度。桥墩受日照温度和辐射影响较大的范围位于距外表面50 cm以内。

(2) 温度和日照辐射对桥墩偏位影响极大。因此建议,为避免此类偏位对施工引起不利影响,桥墩混凝土浇筑应当选择墩身温度较为均衡的凌晨04:00—05:00进行。对104 m高墩来说,温度引起墩顶最大偏位为31.1 mm,已经超过规范轴线偏位允许值,需严格控制施工。墩顶轴线偏位和墩高呈二次关系,桥墩高于50 m时需采用严格的纠偏措施。

(3) 按混凝土抗拉强度设计值来考虑,施工过程中墩顶混凝土有开裂的风险,需合理布设防裂钢筋或采取温控措施,以防止混凝土开裂。

参考文献:

[1] 王琦.圆端型空心墩日照温度效应研究[D].兰州交通大学硕士学位论文,2016.

[2] 廖朝华.公路桥涵设计手册.墩台与基础[M].2版.北京:人民交通出版社,2013.

[3] 吕文江,李永利,解瑞松,等.超高薄壁空心高墩的温度效应研究[J].公路交通科技(应用技术版),2014(11).

[4] 凌桂龙.ANSYS14.0热力学分析从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2013.

[5] 张运波.薄壁空心高墩的温度效应及其对稳定性影响的研究[D].中国铁道科学研究院博士学位论文,2012.

[6] 谢新.高海拔峡谷地带薄壁空心高墩日照温度效应研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2017.

[7] 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.

[8] 张亮亮,陈勇,张海洋.高速铁路空心高墩日照温度场研究[J].山东交通学院学报,2013(1).

[9] 张亮亮,赵亮,袁政强,等.桥墩混凝土水化热温度有限元分析[J].重庆大学学报(自然科学版),2007(10).

[10] 周姐姐,张运波.薄壁空心高墩温度效应仿真分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013(4).

[11] 陈国荣.有限单元法原理及应用[M].北京:科学出版社,2016.

[11] 盛焰正,刘国坤,赵海军.单箱多室混凝土箱梁结构的温度场预测[J].中外公路,2018(4).

[11] 李彪,周伟,杨龙.基于桥梁不同走向及墩身截面形式的薄壁高墩日照温度效应分析[J].中外公路,2016(6).