

乌海黄河大桥箱梁截面日照温度场及温度应力研究^{*}

吴瑞瑞, 林友杨

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 桥梁结构在日照作用下会产生不均匀温度场, 出现温度应力, 给桥梁的正常使用造成威胁。文中以乌海黄河大桥为研究背景, 基于热分析基本理论, 利用 ANSYS 软件建立二维箱梁截面模型, 对砼箱梁进行温度场数值分析, 得出箱梁截面各时刻温度场分布和沿梁高方向温差分布曲线, 并求解温度应力分布及截面关键路径上温度应力变化情况。

关键词: 桥梁; 箱梁; 日照温度场; 温度应力

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)05-0097-05

桥梁结构通常处于变化的自然环境中, 会受到太阳辐射、大气温度等多种因素的影响, 结构会因温度改变而发生变形。在桥梁工程施工和运营过程中, 温度应力会削弱桥梁的承载能力, 甚至导致砼开裂, 对桥梁的正常使用和寿命构成极大威胁。实际桥梁结构中, 沿桥梁纵向的日照辐射相差不大, 温度变化不明显, 因而通常将箱梁的三维温度场简化为二维, 重点研究箱梁截面上的温度场分布和应力分布。文中以乌海黄河大桥为研究背景, 基于热分析基本理论, 应用 ANSYS 软件对箱梁截面进行温度场和应力场二维有限元分析。

1 研究理论和方法

1.1 热分析基本理论

桥梁结构承受的温度荷载分为日照温度、骤然温差和年温变化, 其中日照温度荷载对箱梁截面温度场分布的影响最大, 尤其是在太阳辐射强度较强的地区。太阳辐射引起的温度荷载主要以热对流和热辐射的方式对桥梁结构传递热量。

通过建立 Fourier 热传导微分方程并施加边界条件进行温度场分布求解, 砼结构的三维非稳态热传导微分方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\omega}{c\gamma} \quad (1)$$

式中: α 为砼的导温系数, $\alpha = \lambda / (c\gamma)$; λ 为砼的导热系数; c 为砼的比热; γ 为砼的重度; ω 为砼单位体积内放出的热量。

若假定砼是均匀、各向同性且连续的, 则 α 、 λ 、

c 、 γ 均可视为常数。

热传导微分方程的边界条件有结构边界的温度函数、结构表面的热流密度、与结构相接处介质的温度和热流密度。对于自然环境下的砼结构, 主要考虑太阳辐射和大气热交换两类因素引起的热量交换。砼结构表面受到太阳辐射, 吸收热流密度, 属于第二类边界条件, 可表示为:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = q \quad (2)$$

$$q = \alpha I \quad (3)$$

式中: α 为太阳辐射吸收系数, 对于砼结构, α 一般取 0.65; I 为太阳辐射总照度, 为直接辐射和散射辐射强度之和。

砼结构表面与周围大气发生热交换, 属于第三类边界条件, 用 Newton 冷却方程表示为:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h(T_f - T) \quad (4)$$

将上述两项热流密度合并, 并用第三类边界条件的形式进行推导, 得:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = q + h(T_f - T) = h \left[\left(T_f + \frac{q}{h} \right) - T \right] = h(T_a - T) \quad (5)$$

式中: T_a 为综合气温, 按式(6)计算。

$$T_a = T_f + \frac{q}{h} = T_f + \frac{\alpha I}{h} \quad (6)$$

根据以上公式, 只要确定综合气温 T_a 和换热系数 h 及结构初始温度 T , 便可确定微分方程的边界条件。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178361); 湖北省自然科学基金资助项目(2013CFB342)

1.2 温度边界条件的取值

1.2.1 大气温度 T_f

根据乌海市 2015、2016 年的气象资料,夏季 7—8 月平均气温最高,最高 32.6 °C,最低 19.1 °C,根据式(7)~(9)可模拟箱梁外的夏季平均日气温。箱梁内的温度变化幅度不大,一般在 3 °C 以内,平均日最高温度取 27 °C,亦采用上述公式进行模拟。

$$T_f = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \sin \frac{(h+30)\pi}{24} \quad (0 \leq h \leq 6) \quad (7)$$

$$T_f = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \sin \frac{(h-10)\pi}{16} \quad (6 < h \leq 14) \quad (8)$$

$$T_f = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \sin \frac{(3h-22)\pi}{40} \quad (14 < h \leq 24) \quad (9)$$

1.2.2 太阳辐射照度 I

乌海市地处北纬 40° 左右,大气透明度等级为 4 级,由《暖通空调规范实施手册》第二章附录 A 和附录 C 可得到其夏季太阳总辐射照度。考虑到中国大部分城市的气象站只能提供水平面的总辐射照度,缺少直射或散射辐射强度,采用有较高准确度的 Erbs 直散分离模型求解水平面上太阳直散射照度。乌海市晴空指数为 0.6,采用式(10)求出散射照度系数,再乘以总辐射照度即可求出散射照度。

$$K_d = 0.951 \, 1 - 0.160 \, 1 K_t + 4.388 K_t^2 - 16.638 K_t^3 + 12.366 K_t^4 \quad (0.22 \leq K_t \leq 0.80) \quad (10)$$

1.2.3 综合换热系数 h

桥梁结构与周围空气通过热对流和热辐射进行热交换,综合换热系数 h 为对流换热系数 h_c 和辐射换热系数 h_r 之和,即:

$$h = h_c + h_r \quad (11)$$

对于对流换热系数,风速是主要影响因素。以 14:00 时风速为基准,采用式(11)对风速进行模拟,可得到一天的风速变化[见式(12)]。然后采用式(13)计算对流换热系数。

$$v(t) = 0.476 - 0.405 \cos \frac{2\pi t}{24} - 0.299 \sin \frac{2\pi t}{24} + 0.040 \cos \frac{4\pi t}{24} + 0.031 \sin \frac{4\pi t}{24} + 0.017 \cos \frac{6\pi t}{24} + 0.022 \sin \frac{6\pi t}{24} \quad (12)$$

$$h_c = 4.35 + 3.0v \quad (v \leq 5 \text{ m/s}) \quad (13)$$

辐射换热系数相对较稳定, $h_r = 5$ 。刘照球通过多次试验得到与实际工程吻合度较高的综合换热系数计算公式:

$$h = 12.47 + 3.33v \quad (14)$$

自然环境中的桥梁结构,不同部位在不同时间段受太阳辐射的情况各不相同。受太阳辐射时,温度变化要考虑对流和辐射的影响,换热系数采用综合换热系数;不受太阳辐射时,综合换热系数采用对流换热系数即可。

1.2.4 综合气温 T_a

乌海黄河大桥自西向东跨越黄河,箱梁的北侧和南侧是受辐射面。顶板白天受到太阳直接辐射和散射辐射;腹板由于有翼板遮挡,可忽略早上和傍晚一小段时间的直接辐射,两侧腹板可视为只受散射辐射;底板也只受散射辐射,即 I 取散射辐射值。

根据日气温值 T_f 、太阳辐射照度 I 和综合换热系数 h ,利用式(6)即可计算得到结构各朝向的综合气温 T_a 。

2 数值模拟分析

2.1 工程概况

国道 110 线乌海黄河大桥位于乌海市海勃湾水利枢纽工程上游 19.1 km 处,跨越黄河段主桥采用 (120+220+120) m 中央索面部分斜拉桥。主梁采用变高度钢筋砼连续箱梁,梁高 4.0~8.5 m。桥面标准宽度 33.5 m,设 1.5% 双向横坡。桥塔为钢筋砼实体哑铃形断面,桥面以上有效塔高 40 m。大桥结构体系为塔梁固结,塔梁与桥墩分离。箱梁标准截面见图 1,所用 C55 砼的物理参数见表 1。

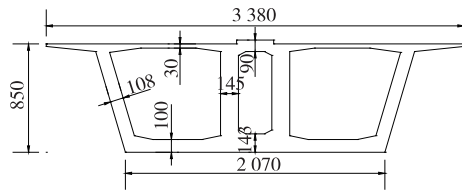


图 1 箱梁标准截面构造(单位:cm)

表 1 砼材料的物理参数

| 项目 | 数值 |
|--|--------------------|
| 导热系数 $\lambda / [W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}]$ | 1.74 |
| 比热 $c / [J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}]$ | 9.20 |
| 热膨胀系数 α | 10^{-5} |
| 密度 $\rho / (kg \cdot m^{-3})$ | 2 500 |
| 弹性模量/MPa | 3.55×10^4 |
| 泊松比 | 0.2 |

乌海市位于内蒙古自治区西南部,东经 106.36° ~ 107.05° ,北纬 39.15° ~ 39.52° 。地处大陆深处,属于典型的大陆性气候,春秋季短,冬夏季长,昼夜温差大,日照时间长,光热资源丰富,多年平均日照时间为 3 138.6 h,比华北同纬度地区多 500~700 h。有历史记录以来的极端最高气温为 40.2°C 、最低气温为 -36.6°C ,年平均风速为 2.9 m/s。

2.2 有限元模型

采用 ANSYS 有限元软件对砼箱梁截面进行二维瞬态温度场分析,并作如下假设:1) 砼材料为各向同性、均质,且不考虑预应力钢束对砼材料导热性能的影响;2) 砼材料的各物理参数与温度无关;3) 箱梁各单元具有相同的初始温度。

采用间接法分析箱梁标准截面的温度场及温度场效应,先采用 plane55 单元进行热分析,然后将单元转换为 plane182 进行结构应力分析。单元网格划分见图 2。



图 2 箱梁截面网格划分

共建立 240 个时间步,对应 10 d、240 h。每小时设置 1 个时间步,荷载步的时间为 3 600 s,第一个荷载步结束时间为早上 6:00。采用斜坡荷载方式加载,即 $KBC=0$ 。

采用 ANSYS 进行热分析求解温度场时只能指定一个常数作为初始条件,假定箱梁截面各单元具有相同的初始温度,为 20°C 。但实际上箱梁截面各处的初始温度并非均匀分布,为此采取同时重复施加边界条件的方法对温度场进行迭代求解,直到求解的温度收敛为止。图 3 为初始温度分别为 20、 25°C 时顶、底板节点温度时程,从中可见,第 9 d 箱梁顶、底板节点的温度均达到收敛。图 4 为箱梁初始温度分别为 20、 25°C 时第 216 h 结束后(即第 10 d 开始时)的温度场分布,从中可见,第 10 d 的初始阶段,二者的温度分布基本一致。以上两点证明假设均匀初始温度并采用重复施加边界条件求解箱梁截面温度场的方法合理、可靠。分析时取初始温度 20°C 时第 10 d 的计算结果。

3 箱梁截面温度场分布

3.1 温度场分布

使用 ANSYS 通用后处理器 POST1 可得到不

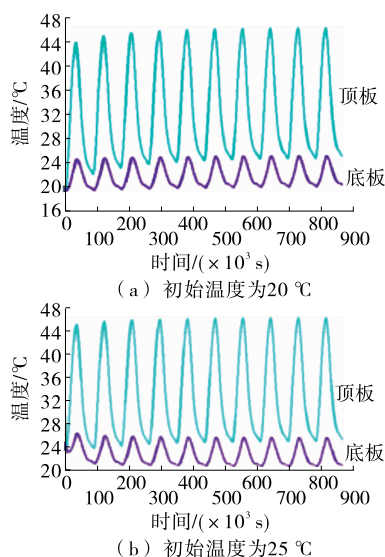


图 3 不同初始温度时的温度时程

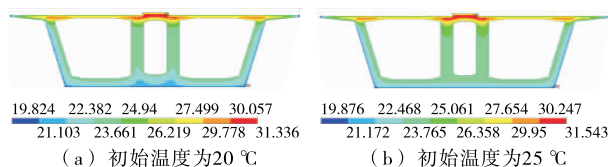


图 4 不同初始温度时的温度场分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

同时刻的截面温度场分布,图 5 为箱梁截面典型时刻的温度场分布。

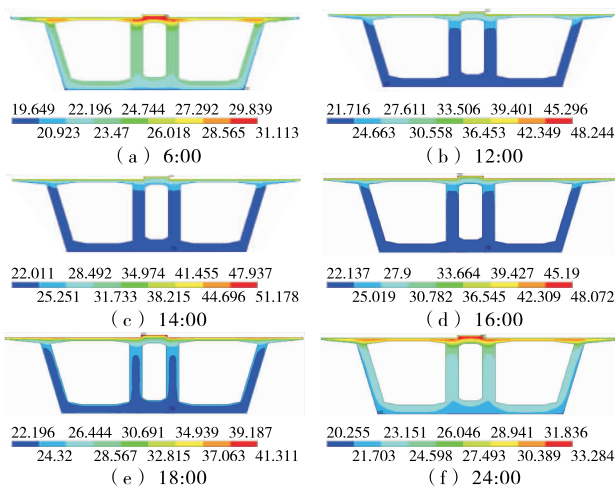


图 5 箱梁截面不同时刻的温度场分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

由图 5 可知:1) 箱梁截面的最高温度出现在 14:00 时,为 51.178°C 时;最大温差(即最不利温度场分布)也出现在 14:00,为 29.167°C 。而前文中夏季日综合气温最大值出现在中午 12:00 时,可见箱梁截面温度不会与外界温度同时达到极值,而是滞后于外界气温最大值 2 h。这是由于砼从顶(底)板

到砗内部传导热量需要时间。2) 箱梁截面温度场在任何时刻都不是均匀分布的。6:00 时, 箱梁内部温度高于外表面温度。接受了一上午日照后, 箱梁整体温度都有上升, 但不同位置温度上升幅度不相同。14:00 时, 箱梁顶面温度达到极值, 而底板温度上升较缓慢。在下午, 阳光辐射逐渐减弱, 顶板温度逐渐降低, 底板温度仍缓慢上升。这是由于顶板接受的热量逐渐沿腹板向下传导, 在云图中可看到温度升高区域向下蔓延。

3.2 温度时程变化

使用 ANSYS 时间历程处理器 POST26 可得到箱梁截面不同高度处节点的温度时程, 此处查看第 10 d 的温度结果。根据上述温度场分布, 在截面同一高度处, 内腹板和外腹板的温度相差不大, 而越靠近外腹板外侧, 温度随时间变化越剧烈。因此, 节点位置分别选取沿外腹板距顶板 0、0.1、0.2、0.3、0.4 m 处和沿外腹板距底板 0、0.1、0.2、0.3、0.4 m 处。不同节点的温度时程见图 6、图 7。

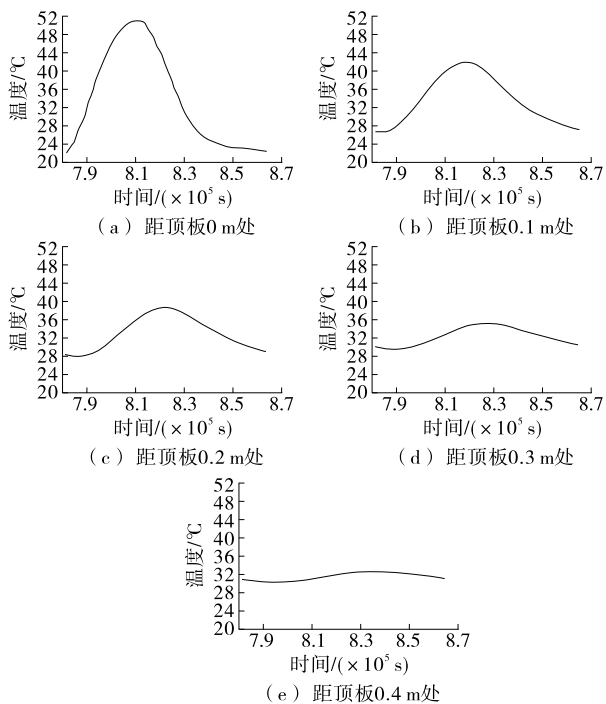


图 6 距顶板不同高度处的温度时程

由图 6 可知: 随着距顶板距离的增加, 最高温度逐渐减小, 与箱梁顶板距离在 0.3 m 内时温度变化较剧烈, 最大温差为 8~29 °C; 距离超过 0.3 m 后, 温度变化幅度趋缓。

由图 7 可知: 与箱梁底板距离在 0.1 m 内时温度变化较明显; 超过 0.1 m 后, 各处温度变化较平

稳, 变化幅度较小。

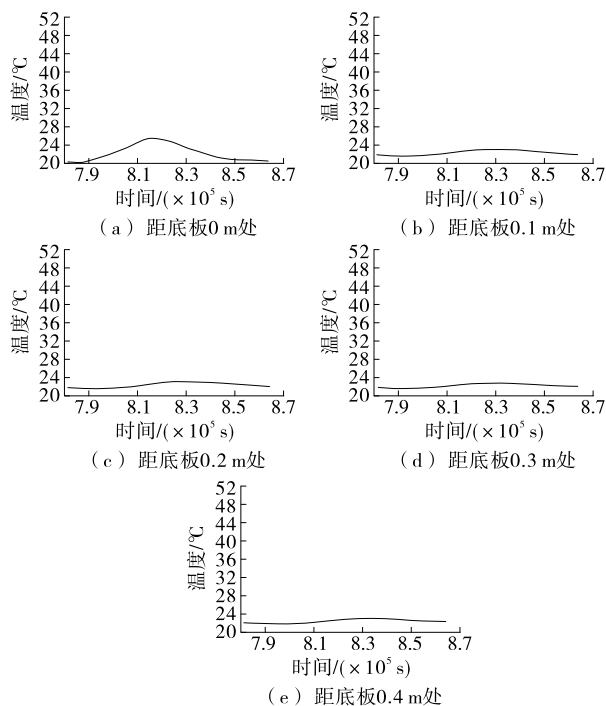


图 7 距底板不同高度处的温度时程

对比图 6、图 7 可知: 1) 箱梁截面各处温度不是均匀分布的, 总体上, 顶部位置温度高于底部位置, 且顶部位置温度变化幅度比底部位置更剧烈。2) 随着与箱梁顶(底)板距离的增加, 到达温度峰值的时间逐渐推后, 温度最大值也逐渐减小。

3.3 梁高方向的温度分布

利用 ANSYS 通用后处理器 POST1 的路径显示功能可显示指定时刻砗在指定路径的温度变化。选择 14:00 时由顶板至底板的梁高方向路径的温度变化, 并将其温差曲线与铁路、公路桥涵设计规范进行对比(见图 8)。

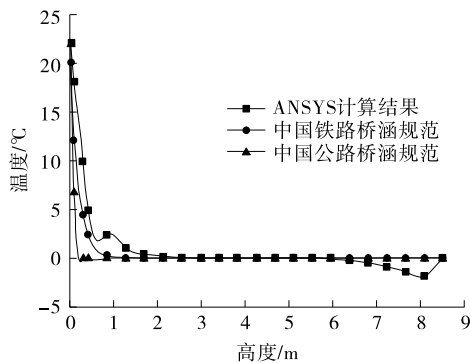


图 8 沿腹板高度处的温度变化

由图 8 可知: 三者的温度剧烈变化范围均为 0

~0.5 m,且变化趋势大致一致。超过这一范围后,两规范温差值不再变化;ANSYS 计算温度则在底板附近小幅变化,最低点出现在距底板约 0.5 m 处。计算模型对于温度沿梁高方向分布的描述更细致、更准确。

4 温度应力分析

解出箱梁截面各时刻温度场分布后,将热单元 plane55 转换成结构单元 plane182 进行温度应力求解。根据不同时刻温度场分布,14:00 时箱梁截面温差最大,为最不利分布状态。图 9 为 14:00 时横向和竖向温度应力分布。

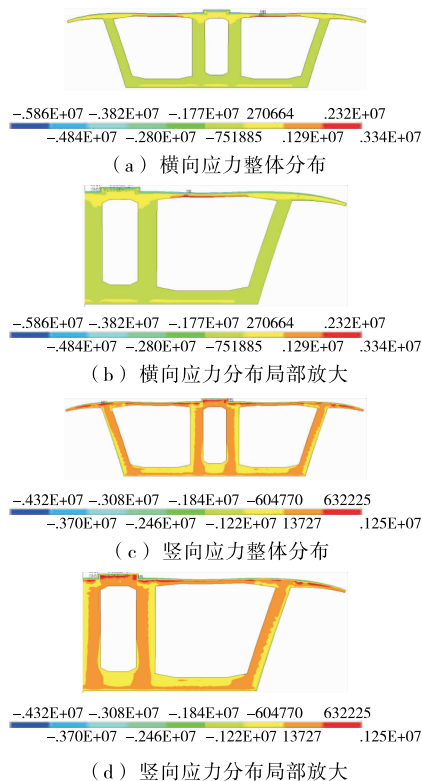


图9 温度应力分布(单位:Pa)

由图 9 可知:1) 箱梁截面的温度应力场沿砼顶板、底板及腹板厚度方向呈非线性分布,梁外表面主要受压应力,内表面主要受拉应力,且压应力大于拉应力。2) 箱梁截面的横向应力,最大压应力出现在顶板外表面,为 -5.86 MPa ;最大拉应力出现在顶板内表面,为 3.34 MPa 。3) 箱梁截面上同一点处的竖向应力总体上比横向应力小,最大压应力为 -4.32 MPa ,最大拉应力为 1.25 MPa 。

5 结论

(1) 箱梁截面上沿着板厚、壁厚方向的温度呈

非线性分布。

(2) 箱梁整个截面最不利温度分布状态和最高温度出现在 14:00 时,比外界最高温度出现的时间滞后 2 h。

(3) 顶板温度显著变化范围为 0.3 m,与中国公路桥涵规范中温差曲线范围 0.4 m 的规定基本一致;底板温度显著变化范围为 0.1 m。超过这两个范围的部位的温度相差不大,且较稳定。

(4) 在最不利温度场分布情况下(14:00 时),箱梁截面的横向应力中,最大压应力出现在顶板外表面,为 -5.86 MPa ;最大拉应力出现在顶板内表面,为 3.34 MPa 。截面同一位置处的竖向应力小于横向应力。

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] 杨继.斜拉桥箱梁温度场及温度效应的研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.
- [3] 刘照球.混凝土结构表面对流换热研究[D].上海:同济大学,2006.
- [4] 左大康,弓冉.中国太阳直接辐射、散射辐射和太阳总辐射间的关系[J].地理学报,1962,28(3).
- [5] 张朝晖.ANSYS 热分析教程与实例解析[M].北京:中国铁道出版社,2007.
- [6] 庄奕挺.混凝土斜拉桥箱梁的温度效应分析及长期温度疲劳效应分析[D].广州:华南理工大学,2016.
- [7] 石赛营.大跨度斜拉桥日照温度效应的理论与研究应用[D].广州:华南理工大学,2013.
- [8] 李洪学.铁路部分斜拉桥温度场与温度效应分析[D].成都:西南交通大学,2013.
- [9] 张谢东,蔡素军,石明强.混凝土箱梁温度场观测与分析[J].公路交通科技,2008,25(10).
- [10] 贺小春,袁建伟.砼箱梁截面的实测温度场及其分析[J].公路与汽运,2013(5).
- [11] 谢旭,张海萍,肖新辉.考虑沥青路面影响的钢箱梁桥日照温度场数值模拟[J].公路与汽运,2017(5).
- [12] 王友彪.大跨度钢管混凝土拱桥温度场及温度效应分析[D].成都:西南交通大学,2013.
- [13] 刁飞.铁路 PC 部分斜拉桥日照温度场及温度效应分析[D].成都:西南交通大学,2015.