

裂缝对空心桥墩温度场及其应力的影响

吴云芳^{1,2}, 林 博^{1,2}, 欧阳硕^{1,2}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045)

摘要: 为了研究裂缝对空心墩温度场和应力场的影响, 以寒潮作用下的圆形空心桥墩为例, 根据固体热传导微分方程和考虑温度应力的广义虎克定律, 选择符合实际情况的边值条件, 采用 ANSYS 软件计算了在寒潮作用下不同裂缝深度的混凝土桥墩温度场及其应力, 计算结果说明: 裂缝深度对混凝土圆形空心墩的温度场影响不大, 空心墩外表面温度应力最大值出现在裂缝处, 并且裂缝尖端的应力随着裂缝深度增加而增大, 引起原有裂缝的继续发展, 对混凝土桥墩产生不利影响。

关键词: 裂缝; 桥墩; 温度场; 温度应力

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)04-0485-06

Effect of crack on temperature field and stress of hollow piers

WU Yunfang^{1,2}, LIN Bo^{1,2}, OUYANG Shuo^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area(Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to study the effect of crack on the temperature field and stress field of the hollow piers, this paper takes the circular hollow piers under the action of cold tide as an example according to the solid heat conduction differential equation and the generalized Hooke's law considering the temperature stress. In view of the differential equation of solid heat conduction and the generalized Hooke's law considering the temperature stress, the boundary conditions are chosen with the actual situation. The ANSYS simulation is performed for calculating the temperature field and stress of concrete piers with cracks in different depths. Results show that the depth of the crack has little effect on the temperature field of the concrete circular hollow pier, and the stress at the crack tip increases with the increase of the crack depth, which causes the development of the original cracks and adversely affects the concrete piers.

Key words: crack; pier; temperature field; temperature stress

对混凝土桥梁温度场及其效应的研究起源于 20 世纪 50 年代, 美国的 Zuk^[1] 推导出了结合梁顶、底面之间最大温差的近似方程, 采用线性温度分布分析了结合梁的温度应力。意大利的 Saetta^[2] 分析了混凝土结构在温度荷载作用下的温度应力是怎样计算的, 提出了按二维平面应变有限单元法来分析箱型截面混凝土结构的温度应力。近年来研究人员对寒潮作用下的温度应力做了大量研究: 河海大学的张子明等^[3] 研究了气温骤降引起大体积混凝土温度变化和温度应力的计算方法, 给出气温骤降引起的温度变化规律及温度应力情况; 曾永平等^[4] 进行了铁路空心墩在寒潮作用下温度与应力场的实验研究, 发现降温越快, 对空心墩墩壁温度场影响深度越浅, 桥墩外表面拉应力

越大, 越可能造成表面开裂; 长安大学的蒋国富^[5] 对洛河大桥的 13# 桥墩的温度场和温度应力进行了现场观测, 推导出了适合陕北地区的混凝土薄壁空心桥墩的温度场表达式。东南大学的贾琳^[6] 指出我国公路桥涵设计规范所采用的温差值明显偏小。陈天地等^[7] 在高铁桥墩内预埋温度传感器, 实测寒潮来临时墩壁温度场分布, 总结出寒潮降温与墩壁内温度应力的对应关系。

以上工作都是在理想条件下研究混凝土结构的温度场, 事实上混凝土结构广泛地存在着微小裂缝和缺陷, 也有许多混凝土结构长期带裂缝工作, 而大多数研究者并不太重视裂缝对混凝土结构温度场与应力场的影响。裂缝对温度荷载作用下墩身温度场及其应力的影响究竟如何? 是否裂

收稿日期: 2017-06-13

修改稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578098)

第一作者: 吴云芳(1963—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究桥梁与结构工程领域。E-mail: 2901515464@qq.com

通讯作者: 林 博(1992—), 男, 硕士生, 主要研究桥梁与稳定性。E-mail: 1373764896@qq.com

缝越深对温度荷载引起的混凝土墩身表面裂缝越不利?关于这些问题的研究资料目前还较少^[8-13],又由于寒潮作用是铁路空心桥墩出现表面裂缝的主要原因之一^[14],因此,本文以寒潮作用下的圆形空心桥墩为例,在空心墩外表面开设不同深度裂缝模拟实际开裂的桥墩,用有限元计算方法研究不同深度微裂缝对混凝土桥墩温度场及其应力的影响。

1 圆形空心桥墩模型截面尺寸、配筋情况及材料性质

设圆形空心桥墩模型内径 3 m,壁厚 0.5 m,混凝土净保护层为 3 cm。根据《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》中轴心受压构件的配筋构造要求,选取纵筋直径为 20 mm,水平环状箍筋直径为 12 mm,纵筋间距为 20 cm,箍筋间距为 15 cm;连接内外纵筋的水平钢筋直径为 10 mm,在竖向的间距为 60 cm,水平方向的间距约为 50 cm,呈梅花形布置。圆形空心桥墩模型钢筋示意图如图 1 所示,其中内侧纵筋和外侧纵筋间距均约为 20 cm。

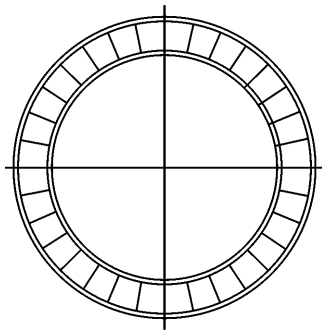


图 1 圆形空心桥墩模型钢筋示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reinforcement in circle hollow pier model

一般空心桥墩混凝土强度等级为 C30,钢筋为 Q235。根据相关资料^[15-16]选取模型材料的力学性能和热性能。混凝土的线膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,泊松比为 0.2;Q235 钢筋线膨胀系数为 $1.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,泊松比为 0.3。

2 圆形空心桥墩的热传导微分方程和边值条件

2.1 热传导微分方程

圆形空心桥墩的热传导微分方程为^[17]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中, $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ 称为固体材料的导温系数,单位为

m^2/s 。若在寒潮作用下无内热源,则 $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$ 。

2.2 边值条件

边值条件是初始条件和边界条件的合称。寒潮作用下圆形空心桥墩的热传导过程是一个非稳态导热过程,求解该问题时必须说明初始条件。初始条件可以是各种各样的空间分布,即

$$T|_{\tau=0} = T_0(x, y, z) \quad (2)$$

寒潮作用下圆形空心桥墩壁内侧和外侧均与空气接触,其边界条件为第三类边界条件——假定经过混凝土表面的热流量与混凝土表面温度 $T(x, y, z)$ 和气温 $T_a(x, y, z)$ 之差成正比,即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a) \quad (3)$$

式中: λ 为材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; β 为对流系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

3 考虑温度应力的广义虎克定律

根据杜阿梅尔-诺伊曼的线性热应力理论,考虑温度应力的广义虎克定律,其形式如下^[9]。

$$\begin{aligned} \epsilon_x - \epsilon_{x0} &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ \epsilon_y - \epsilon_{y0} &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)], \\ \epsilon_z - \epsilon_{z0} &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)], \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}, \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, ϵ_x , ϵ_y 和 ϵ_z 为物体任一点的实际应变值; ϵ_{x0} , ϵ_{y0} 和 ϵ_{z0} 为该点不受约束自由热膨胀所产生的应变值。当物体在不均匀温度场作用下,如果暂时略去机械应力,则物体的实际应变可理解为某种平均温度意义上该点的应变值。所以在高温处 $\epsilon - \epsilon_0 < 0$, 而受压应力;在低温处 $\epsilon - \epsilon_0 > 0$, 而受拉应力。

4 不同裂缝深度的圆形空心桥墩温度场和温度应力的有限元计算结果及分析

4.1 有限元模型

由于在日照作用下墩壁温度随高度的变化较小和寒潮作用下的空心桥墩内外空气温度几乎不随高度变化,所以可近似地认为相同结构形式和配筋的空心桥墩水平横截面上的温度及其应力分布不随高度变化,因此可将空间结构的温度及其应力问题简化为平面问题,采用 ANSYS 软件中的二维耦合场实体单元 plane13 进行温度及其应力的

耦合计算. 采用大型 ANSYS 有限元计算软件建模时, 根据圆形空心桥墩结构的对称性和寒潮温度荷载的对称性, 可选取 1/4 圆环建模, 其有限元计算模型如图 2 所示.

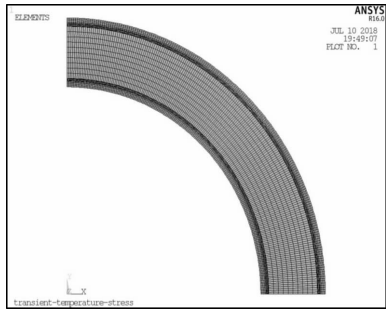


图 2 1/4 圆形空心桥墩有限元模型

Fig. 2 Quarter finite element model of circle hollow pier

为研究不同裂缝深度对混凝土桥墩温度场及其应力的影响, 根据模型外表面裂缝深度不同, 将具体计算模型分为四种: ①情况 1: 无裂缝, 见图 3(a); ②情况 2: 裂缝深度 10 mm, 见图 3(b); ③情况 3: 裂缝深度 20 mm, 见图 3(c); ④情况 4: 裂缝深度 30 mm, 见图 3(d).

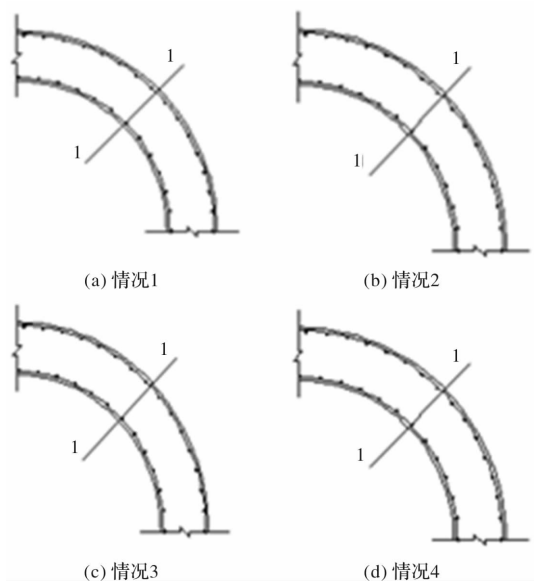


图 3 不同裂缝深度情况下的计算模型

Fig. 3 Computational models with different crack depth

4.2 温度场的有限元计算结果

采用 ANSYS 有限元软件对上述圆形空心桥墩模型进行热力耦合瞬态计算. 假设圆形空心桥墩模型的初始温度 26 °C; 圆形空心桥墩壁内侧空气的对流系数为 5, 气温为 26 °C; 墩壁外侧空气的对流系数为 12.5, 气温为 13 °C.

4.2.1 温度云图

为了节约篇幅, 下面仅给出了寒潮来临后 5 h 和 10 h 四种圆形空心桥墩模型的温度场云图, 见

图 4~5. 从温度场云图可以看出, 四种圆形空心桥墩模型的温度场随寒潮作用时间变化而变化, 墩壁外侧温度变化较大而内侧温度变化很小.

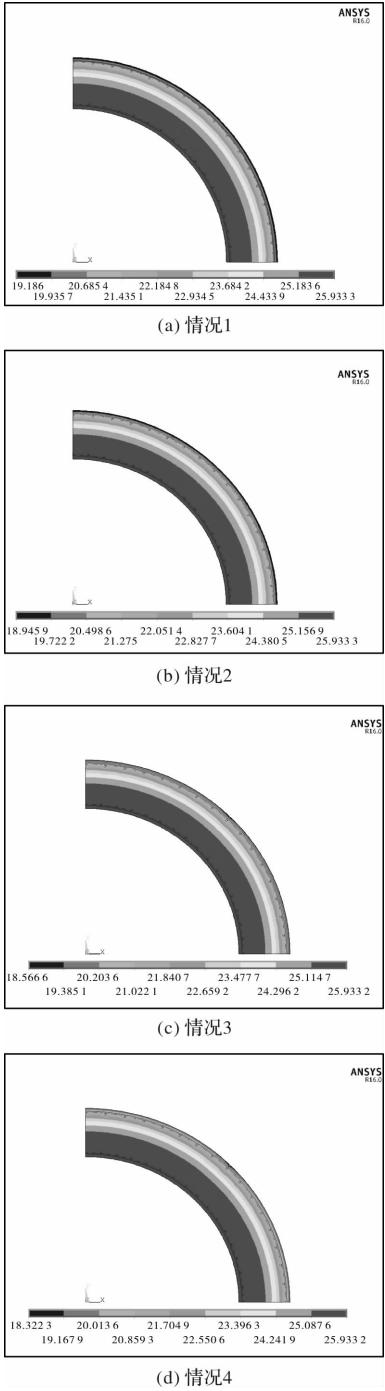
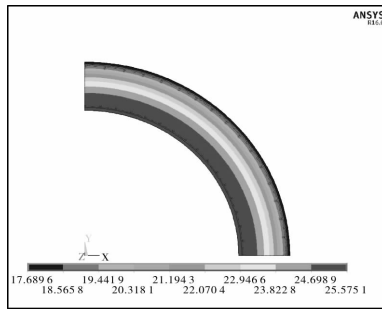


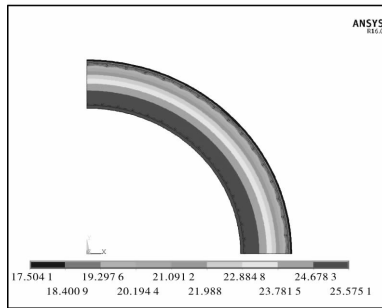
图 4 寒潮来临后 5 h 四种模型的温度场云图
Fig. 4 Temperature cloud picture of four models
5 hours after cold wave

4.3 温度应力的有限元计算结果

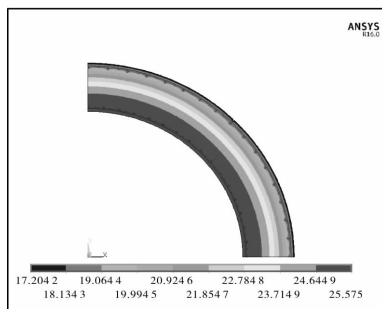
寒潮作用下, 圆形空心桥墩中产生的拉应力主要是沿水平圆周方向的. 当该拉应力超过材料的强度极限时, 桥墩将产生裂缝. 因此, 研究不同初始裂缝深度对混凝土圆形空心桥墩温度应力的影响时, 温度应力主要是指环向应力.



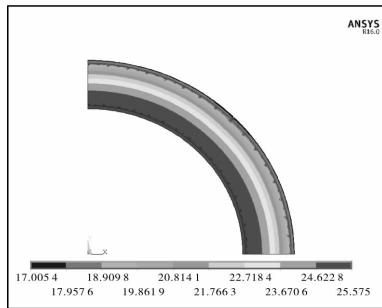
(a) 情况1



(b) 情况2



(c) 情况3



(d) 情况4

图 5 寒潮来临后 10 h 四种模型的温度场云图

Fig. 5 Temperature cloud picture of four models

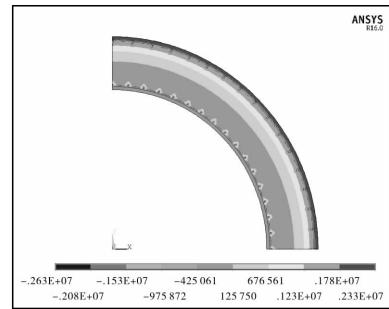
10 hours after cold wave

4.3.1 温度应力云图

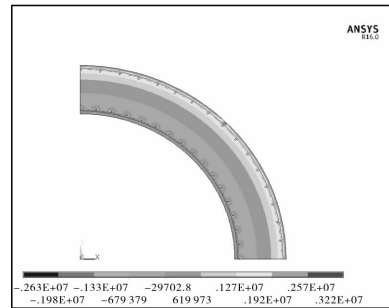
对应上述温度云图,下面给出寒潮来临后 5 h 和 10 h、四种圆形空心桥墩模型的温度应力云图,见图 6~7。从应力云图可以看出,四种圆形空心桥墩模型的温度应力场随寒潮作用时间变化而变化,墩壁外侧环向应力均为拉应力,内侧环向应力均为压应力。

4.3.2 桥墩模型外侧应力随时间变化

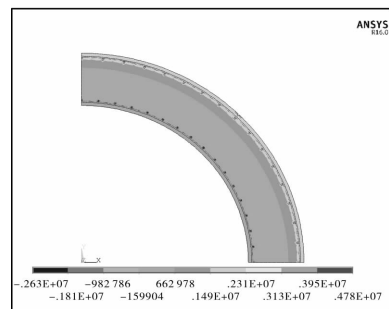
为了比较在寒潮作用下桥墩模型外侧温度应



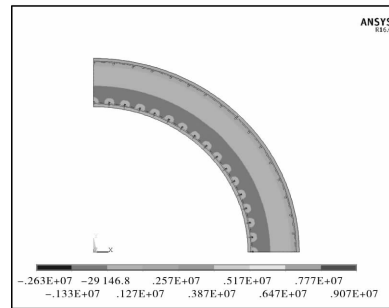
(a) 情况1



(b) 情况2



(c) 情况3



(d) 情况4

图 6 寒潮来临后 5 h 四种模型的应力云图

Fig. 6 Stress cloud picture of four models

5 hours after cold wave

力随时间的变化情况,现将 1-1 截面上圆形空心桥墩墩壁外表面裂缝处温度应力随时间变化的有限元计算结果,绘制成曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,寒潮作用初期三种桥墩模型外侧温度应力均随时间增加而快速增加;寒潮作用 5 h 后外侧温度应力均随时间增加缓慢;寒潮作用 10 h 后外侧温度应力达到最大值,然后再随时间增长而慢慢减小;三种不同裂缝深度桥墩模型外侧温度应力有些差异:裂缝中心处应力以情况 2、3、4 的顺序增

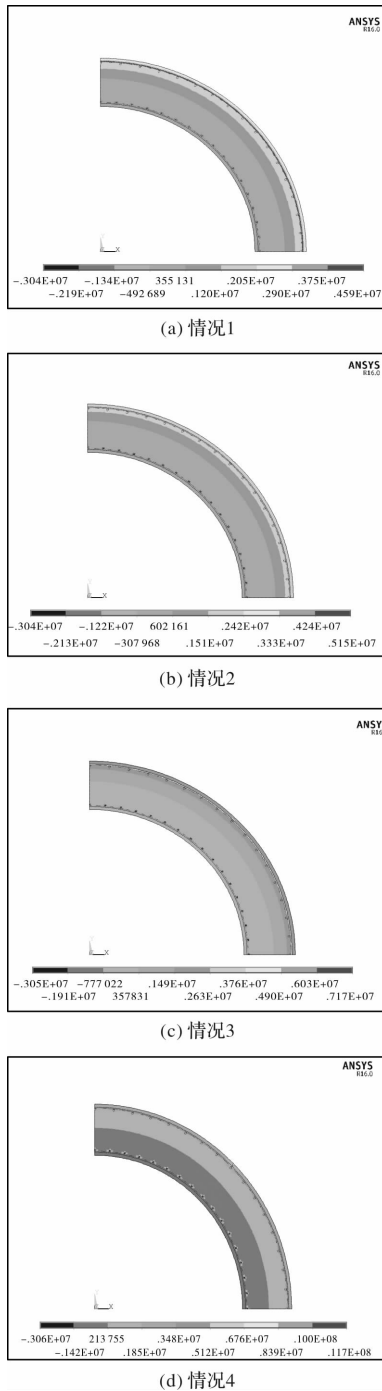


图7 寒潮来临后10 h四种模型的应力云图

Fig. 7 Stress cloud picture of four models

10 hours after cold wave

大,情况2最大应力为3.358 MPa,情况3最大应力为3.837 MPa,情况4最大应力为7.489 MPa。

5 结论

本文采用大型有限元 ANSYS 软件对不同裂缝深度的混凝土空心桥墩和无裂缝混凝土空心桥墩进行了寒潮温度及其应力计算,并将计算结果进行了比较,得到以下结论:

①计算点到墩壁内表面越近,温度变化越小,

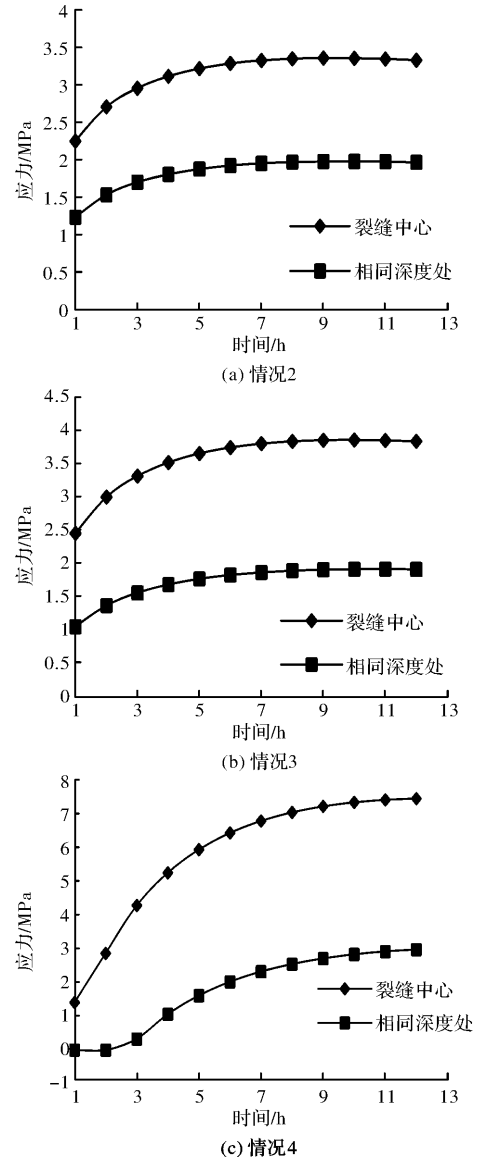


图8 桥墩模型外侧应力随时间变化的对比曲线

Fig. 8 Contrast curve of stress varied with time on the outside of pier models

不同裂缝模型之间温度差异也非常小;

②空心墩外表面温度最低,不同模型之间温度约有差异,情况1、2、3、4模型裂缝处温度依次有微小降低;

③混凝土寒潮温度应力由内到外增大,在圆形空心桥墩壁内侧应力最小,为压应力,外侧为拉应力,最大拉应力在裂缝中心处;

④空心墩壁裂缝处拉应力则因裂缝深度不同而异,例如在1-1截面上,墩壁外侧计算点拉应力以情况1、2、3和4模型的顺序增加,其中情况1模型壁外侧的拉应力最小,其值2.205 MPa大于C30混凝土轴心抗拉强度标准值2.01 MPa^[10],情况4模型壁裂缝处的拉应力最大,其值7.489 MPa大于2.01 MPa。

该计算结果说明表面裂缝对空心墩温度场与应力的影响主要体现在裂缝尖端,不同深度的裂缝对空心墩温度场与应力影响不大,然而裂缝尖端的应力随着深度增加明显增大,并且远远超过相同深度其他位置的应力,对控制裂缝的继续发展非常不利。

参考文献 References

- [1] ZUK W. Thermal and shrinkage stresses in composite beams[J]. ACI Journal, 1961,58(3): 327-340.
- [2] SAETTA A, SCOTTA R, VITALIANI R. Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads[J]. Journal Of Structure Engineering, ASCE, 1995,121(3): 446-457.
- [3] 张子明. 气温骤降时大体积混凝土的温度应力计算[J]. 河海大学学报,2003,31(1):11-15.
ZHANG Ziming. Study on cold wave-induced temperature stresses of mass concrete[J]. Journal Of Hohai University (Natural Sciences), 2003,31(1):11-15.
- [4] 曾永平. 铁路空心墩寒潮作用下温度应力场试验研究[J]. 桥梁建设, 2011,1:48-51.
ZENG Yongping. Test study of temperature and stress fields of railway bridge hollow piers under action of cold wave[J]. Bridge Construction, 2011,1:48-51.
- [5] 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, 2005.
JIANG Guofu. The study of sunlight temperature effect for higher pier of long-span bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [6] 贾琳. 太阳辐射作用下混凝土箱梁的温度分布及温度应力研究[D]. 南京:东南大学, 2001.
JIA Lin. Study on temperature distribution and thermal stress of concrete box girder under solar radiation [D]. Nanjing: Southeast China University, 2001.
- [7] 陈天地. 高速铁路高墩结构寒潮温度场及温度应力研究[J]. 高速铁路技术, 2013(6):24-28,46.
CHEN Tiandi. Study on stress of cold wave and temperature fields of high pier structure on high speed railway[J]. High Speed Railway Rechnology, 2013 (6):24-28,46.
- [8] 东南大学,天津大学,同济大学合编. 混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- Southeast University, Tianjin University, Tongji University [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2003.
- [9] 王润富,陈国荣. 温度场和温度应力[M]. 北京:科学出版社,2006.
WANG Runfu, CHEN Guorong. Temperature field and temperature stress[M]. Beijing: The Science Publishing Company,2006.
- [10] CARIN L. Roberts-Wollman, John E. Breen, and JASON Cawrse. Measurements of thermal gradients and their effects on segmental concrete bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE,2002,7(3): 166-174.
- [11] DUNCAN S. Arsoy, J. M. , and BARKER. R. M. Behavior of a Semiintegral Bridge Abutment under Static and Temperature-Induced Cyclic Loading [J]. J. Bridge Engrg, 2004, 9(2):193-199.
- [12] BARR. P. J. , STANON. J. F. and, EBERHAR. M. O. Effects of temperature variations on precast, prestressed concrete bridge girders[J]. J. Bridge Engrg, 2005,10(2): 186-194.
- [13] 管敏鑫. 柔性桥墩日照温度场与温度应力的实用计算方法[J]. 铁道建筑,1986(1):33-37,69.
GUAN Minxin, A practical method for calculating the temperature field and thermal stress of flexible pier [J]. Railway Engineering, 81986(1):33-37,69.
- [14] 张子明. 寒潮时大体积混凝土的温度应力[J]. 河海大学学报,1994,22(6):94-96.
ZHANG Ziming. Temperature stress of mass concrete in cold wave[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),1994,22(6):94-96.
- [15] 孔祥谦. 热应力有限单元法分析[M]. 上海:上海交通大学出版社,1999 年.
KONG Xiangqian. Analysis of thermal stress finite element method[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press,1999.
- [16] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力和温度控制[M]. 北京:水利电力出版社. 1999.
ZHU Bofang. Temperature stress and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: Water Resources And Electric Power Press. 1999.

(编辑 桂智刚)