

文章编号:1673-9469(2022)02-0064-07

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.02.010

温度梯度作用下钢管混凝土拱桥拱脚混凝土裂缝控制研究

张栋培¹, 冷飞^{1*}, 吴二军¹, 范家怡²

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 苏州安省建筑设计有限公司, 江苏 苏州 215500)

摘要: 针对姚湾东南公路桥, 采用 HohaiRCFE-S 程序建立拱脚局部模型, 并分析拱脚在均匀升温、均匀降温及分别组合日照和气温骤降作用的 4 种工况下的应力状态, 发现日照和气温骤降作用显著增大拱脚混凝土拉应力, 提高开裂风险。为控制拱脚开裂, 提出以裂缝宽度控制为目标的混凝土拉应力限制条件, 对增厚外包混凝土厚度、增设剪力钉、设置拱肋弦杆支撑、拱脚混凝土顶面布置钢板和顶面附近施加预应力等 5 种控裂措施, 分别建立有限元模型并进行应力对比和控裂效果分析。结果表明: 均匀升温+日照和均匀降温+气温骤降工况下, 仅增厚外包混凝土厚度或增设剪力钉不能满足拉应力控制要求; 设置拱肋弦杆支撑或钢板控裂效果差; 施加预应力可明显减小拱脚混凝土拉应力; 施加预应力+增设剪力钉、施加预应力+外包混凝土厚度两种组合方案在 4 种工况下均表现出良好的控裂效果。

关键词: 桥梁与隧道工程; 钢管混凝土拱桥; 拱脚混凝土; 温度梯度作用; 裂缝控制; 数值模拟

中图分类号: U443.23

文献标识码: A

Research on Crack Control of Concrete at Arch Foot in Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridge Under Temperature Gradient Action

ZHANG Dongpei¹, LENG Fei^{1*}, WU Erjun¹, FAN Jiayi²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Suzhou Ansheng Architectural Design Co., Ltd, Suzhou, Jiangsu 215500, China)

Abstract: Temperature gradient action is an important reason for the cracking of concrete at arch foot in concrete-filled steel tube arch bridge during the service period. For Yaowan southeast highway bridge, the local model of arch foot was established by HohaiRCFE-S program, and the stress states of arch foot under four working conditions of uniform temperature rise, uniform temperature drop and superposition of sunshine and suddenly-decreased temperature respectively were analyzed. It was found that the sunshine and suddenly-decreased temperature significantly increased the tensile stress of concrete at arch foot and improved the risk of cracking. In order to control the cracking of arch foot, the limiting conditions of the concrete tensile stress aiming at crack width control were proposed. Five crack control measures were established respectively, such as increasing the thickness of surrounding concrete, adding shear nails, setting chord supports between arch ribs, placing the steel plate on the top surface of concrete and applying prestress near the top surface, and the stress comparison and crack control effect were analyzed. The results show that under the working conditions of uniform temperature rise + sunshine and uniform temperature drop + suddenly decreased temperature, only increasing the thickness of surrounding concrete or adding shear nails cannot meet the requirements of the tensile stress control. Setting chord supports or placing the steel plate has a poor crack control effect, and applying prestress

收稿日期: 2021-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878250)

作者简介: 张栋培(1996-), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 研究方向: 钢筋混凝土结构计算。

* 通讯作者: 冷飞(1976-), 男, 江苏南京人, 博士, 讲师, 研究方向: 钢筋混凝土结构计算。

can obviously reduce the tensile stress of concrete at arch foot; The two combination schemes of applying prestress + adding shear nail and adding prestress + increasing the thickness of surrounding concrete show a good crack control effect under four working conditions.

Key words: bridge and tunnel engineering; concrete filled steel tube arch bridge; arch foot concrete; temperature gradient action; crack control; numerical simulation

钢管混凝土拱桥拱脚受力状态复杂,在运行过程中常出现明显可见的过宽裂缝,影响结构的安全性和耐久性。大量研究表明,温度作用是造成拱脚混凝土开裂的主要原因^[1]。而拱脚在运行阶段受到的温度作用主要分为两种,均匀温度作用和温度梯度作用。范家怡等^[2]以姚湾东南公路桥为工程背景,分析了钢管混凝土拱桥拱脚在荷载和均匀温度作用下的应力状态,认为拱脚开裂的原因是弦杆向外横向变形挤压拱桥拱脚混凝土,导致外包混凝土内产生过大拉应力。邓凤亭^[3]针对拱桥拱脚运行阶段开裂的原因,提出通过加密箍筋和优化钢管壁厚等措施来减小拉应力,但没有考虑温度梯度作用对拱脚的影响。国内外学者的研究表明,温度梯度作用对桥梁内力的影响显著,且日照和气温骤降是最典型的两种温度梯度作用。众多学者^[4-8]分析了桥梁在日照或气温骤降作用下的温度场和温度应力,认为温度梯度作用在很多情况下甚至会产生超过活载的温度应力,成为桥梁开裂的主要原因。孙国富等^[9-11]对钢管混凝土拱桥所做的温度梯度作用研究,得出了和其他桥型类似结论。

随着我国桥梁建设的迅速发展,钢管混凝土拱桥在工程中广泛应用,并不断向极热极寒等气候环境特殊地区推进,拱脚混凝土开裂问题日益严峻。但目前对钢管混凝土拱桥拱脚的温度研究仍相对滞后,相关文献只分析了均匀温度作用对拱脚混凝土的应力影响,没有将温度梯度作用考虑在内,更没有进行均匀温度与温度梯度的组合作用对拱脚混凝土应力影响的研究。因此,常规的抗裂措施难以满足拱脚实际抗裂要求,有必要对合理的抗裂方案进行深入研究。

本文在文献[1]研究基础上,以姚湾东南公路桥为工程背景,应用 HohaiRCFE-S 程序,进行钢管混凝土拱桥拱脚混凝土在温度梯度作用下的开裂风险分析,提出增厚外包混凝土厚度、增设剪力钉、设置拱肋弦杆支撑、拱脚混凝土顶面布置钢板和顶面附近施加预应力等5种控裂措施,分别对拱脚混凝土的裂缝控制效果进行对比分析,提出优化控裂方案,以供同类工程的合理控裂方案选择

时加以借鉴。

1 工程背景

姚湾东南公路桥为钢管混凝土拱桥,该拱桥拱脚立面呈平躺V字型,厚3.5 m,拱肋由4根相互连接的钢管混凝土组成,如图1所示。拱脚混凝土采用C50,钢管外径1.12 m,壁厚22 mm,采用Q345C钢材,内灌C55微膨胀混凝土。上弦钢管插入拱脚7.0 m,下弦钢管插入拱脚4.0 m,钢管外径距拱脚混凝土截面边缘(外包混凝土厚度)为250 mm。拱肋伸入拱脚部位初设方案设有剪力钉,如图2所示。剪力钉直径19 mm,长度175 mm,每层沿拱肋环向布置8根;上、下弦钢管在插入拱脚

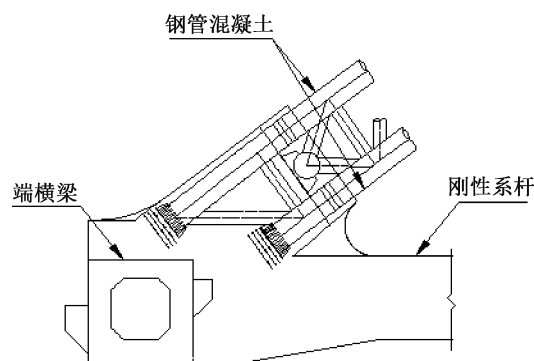


图1 拱脚结点

Fig. 1 The node of arch foot

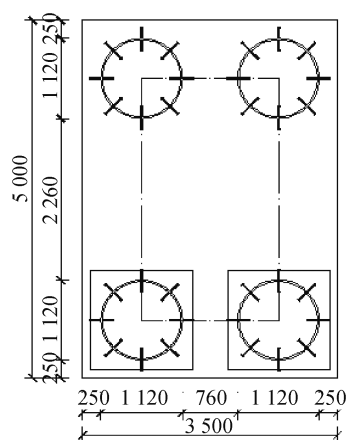


图2 拱脚剪力钉布置(单位:mm)

Fig. 2 Layout of shear nails at arch foot

部位分别布置 14 层和 8 层剪力钉,首层距钢管底部 250 mm,层间距 500 mm。

2 温度梯度作用下的拱脚应力分析

2.1 拱脚局部模型

本文和文献[1]一样,采用两步分析法进行拱脚应力分析。首先采用 Midas/Civil 软件建立全桥杆系模型,进行荷载和均匀温度作用下各组合的计算,提取出拱肋截面最不利内力组合;再建立拱脚局部模型,将全桥杆系模型中提取的最不利内力组合作为外荷载施加。

拱脚局部模型采用 HohaiRCFE-S 软件建立,该软件是河海大学自编大型有限元计算分析程序,同其他常用有限元模拟分析软件相比,其特有的带埋置弹簧单元在模拟剪力钉时具有划分网格方便、计算精度高的优点。模型中,拱脚混凝土和钢管拱肋采用 8 结点空间等参单元;弦杆与拱脚混凝土界面以及它们之间的剪力钉采用带埋置弹簧界面单元^[12];预应力筋采用埋置杆单元,预应力按初应力施加。计算时,假定混凝土为线性材料,钢管混凝土拱肋等效为均质材料,但考虑拱脚混凝土与拱肋弦杆之间界面接触非线性和剪力钉的非线性^[13]。建立的拱脚局部模型如图 3 所示。

拱脚混凝土与拱肋钢管的力学和热学指标按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)^[14]取用,如表 1 所示。

2.2 工况设置

本文共选取 4 种工况,如表 2 所示。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[15],均匀温度作用下升温的温度差为结构最高平均温度与最低初始平均温度之差,降温的温度差为结构最低平均气温与最高初始平均温度之差。结合气象资料,在均匀温度作用下,升温 and 降温温度差均取 20 ℃在拱脚局部模型中,将 9 种拱肋最大内力荷载组合(最大轴力,最大 y 向正、负剪力,最大 z 向正、负剪力,最大 y 向正、负弯矩,最大 z 向正、负弯矩,其中 y 、 z 向分别指横桥向和竖直向)分别和均匀升温、均匀降温作用进行组合,并分析拱脚混凝土应力状态。结果表明,拱脚混凝土最大主拉应力 $\sigma_{1\max}$ 的最大值所出现的组合分别为均匀升温 20 ℃+最大 y 向负剪力组合和均匀降温 20 ℃+最大轴力组合,将这 2 种组合分别定义为均匀升温工况(工况 1-1)和均匀降温工况(工况 1-2)。

混凝土是热的不良导体,当外界环境的温度发生变化后,由于混凝土传热效率低,导致内部温差变化滞后于表面,产生温度梯度作用。日照在拱脚产生外高内低的温差会使内部混凝土受拉;气温骤降降温幅度大,经历时间短,会在拱脚引起外低内高的温差,使拱脚表面出现拉应力。因此本文在荷载与均匀温度作用的基础上,进一步考虑温度梯度作用对拱脚混凝土应力的影响。考虑

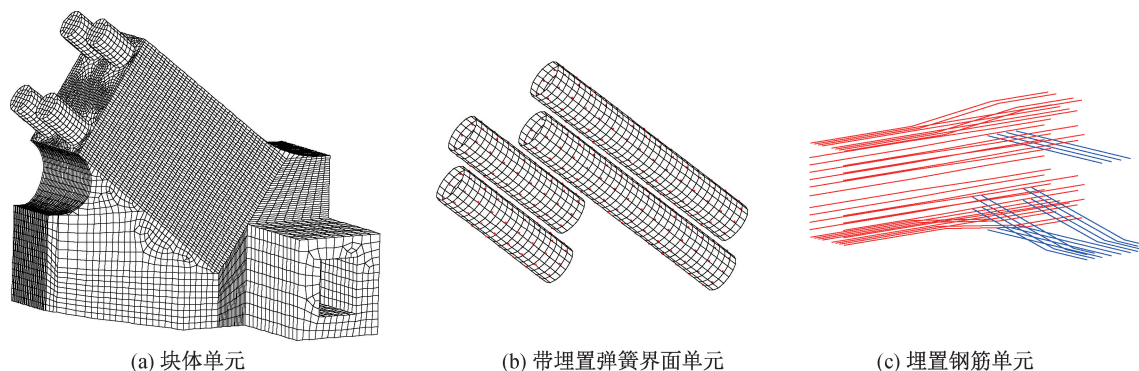


图 3 拱脚局部模型

Fig. 3 The partial model of arch foot

表 1 材料的力学和热学指标

Tab. 1 Mechanical and thermal indexes of materials

材质	容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}$	导热系数 /[$\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$]	导温系数 /[$\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$]
Q345C 钢材	78.5	2.06×10^5	0.28	1.2×10^{-5}	4 147.2	1.148
C50 混凝土	25.0	3.45×10^4	0.20	1.0×10^{-5}	254.4	0.108

到夏季日照引起的温差更大,冬季发生气温骤降的概率更高,因此梯度温度作用下的2种工况分别为:均匀升温+日照工况(工况2-1)和均匀降温+气温骤降工况(工况2-2)。

日照根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[15]给出的竖向温度梯度曲线取用,表面温差 $T_1 = 25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,距表面 100 mm 处温差 $T_2 = 6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,距表面 400 mm 处温差为零。根据气象资料,本地区气温骤降最大降温均未超过 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此气温骤降可取 3 天降温 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$,分析得到的气温骤降温度场参见图 4。

表 2 拱脚混凝土的 4 种工况

Tab. 2 Four working conditions of concrete at arch foot

编号	均匀温度作用/ $^{\circ}\text{C}$	温度梯度作用	拱肋内力荷载组合
1-1	升温 20	—	最大 y 向负剪力
1-2	降温 20	—	最大轴力
2-1	升温 20	日照	最大 y 向负剪力
2-2	降温 20	气温骤降	最大轴力

由图 4 可知,气温骤降前后拱脚内部温度变化很小,内部混凝土降低不到 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$;表面混凝土温度变化很大,由 $6.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-9.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,说明气温骤降时间短,表面附近温度影响较大,内部影响较小,影响深度为 1 000 mm 左右。

2.3 拱脚应力分析

4 种工况下拱脚混凝土的最大主拉应力 $\sigma_{1\max}$ 及应力云图分别如表 3 和图 5 所示。

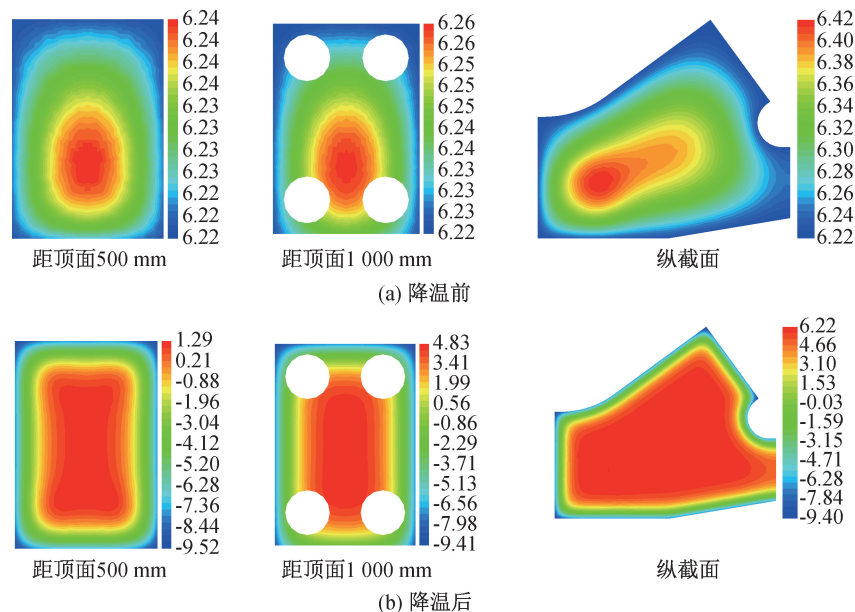


图 4 气温骤降温度场(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Temperature field of suddenly-decreased temperature

表 3 4 种工况下拱脚混凝土的最大主拉应力 $\sigma_{1\max}$

Tab. 3 Maximum principal tensile stress $\sigma_{1\max}$ of concrete at arch foot under four working conditions

工况	应力/MPa	$\sigma_{1\max}$ 至顶面距离/mm
1-1	5.27	10
1-2	2.07	1 500
2-1	6.04	500
2-2	5.17	1 500

由表 3 和图 5 可知,日照与气温骤降作用对拱脚混凝土应力影响显著。在温度梯度作用下拱脚混凝土最大主拉应力 $\sigma_{1\max}$ 显然远远超过其抗拉强度($f_{tk} = 2.65\text{ MPa}$),存在开裂风险。工况 2-1(均匀升温+日照)和工况 2-2(均匀降温+气温骤降)为拱脚混凝土裂缝控制最不利工况。

3 裂缝控制措施及其效果对比

3.1 裂缝控制措施

要控制拱脚混凝土裂缝宽度,需减少最大主拉应力 $\sigma_{1\max}$,主要思路有三个:(1)增厚外包混凝土厚度,扩散应力(措施 1);(2)分散应力传递,减小弦杆对拱脚混凝土的挤压变形,从而减小挤压应力,具体措施为增设剪力钉加强弦杆与混凝土的连接(措施 2),设置拱肋弦杆支撑(措施 3)或在拱脚混凝土顶面布置钢板(措施 4);(3)沿垂直拱轴方向施加环向预应力,减少拱脚混凝土表面拉应力(措施 5)。

上述 5 种控裂措施具体参数设计参数如下,图 6 给出了部分措施的示意。

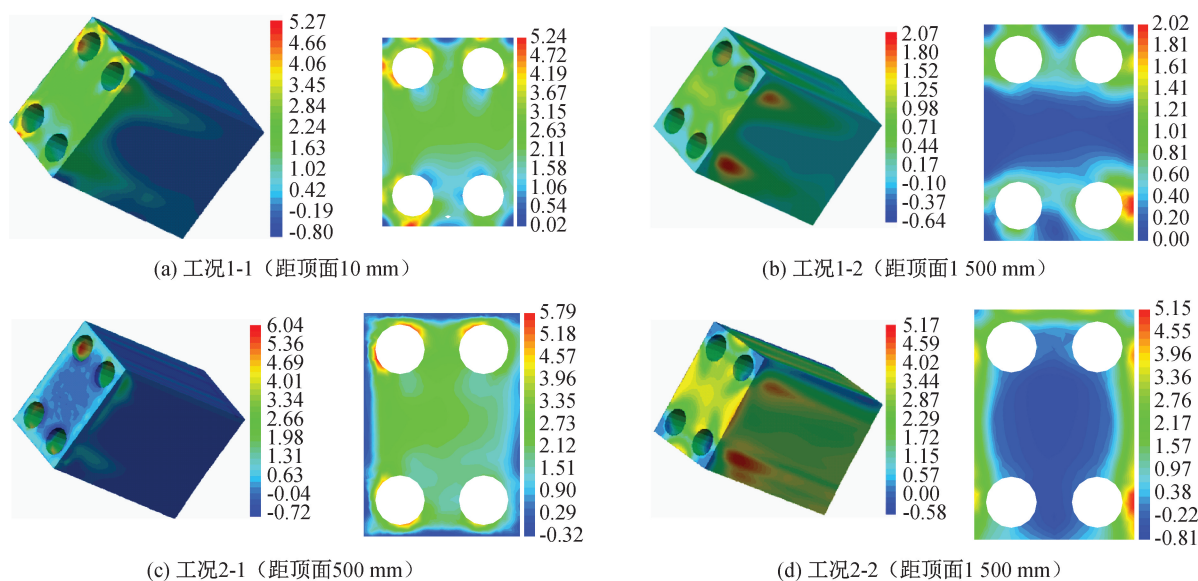


图 5 4 种工况下拱脚混凝土的应力云图

Fig. 5 Stress cloud diagrams of concrete at arch foot under four working conditions

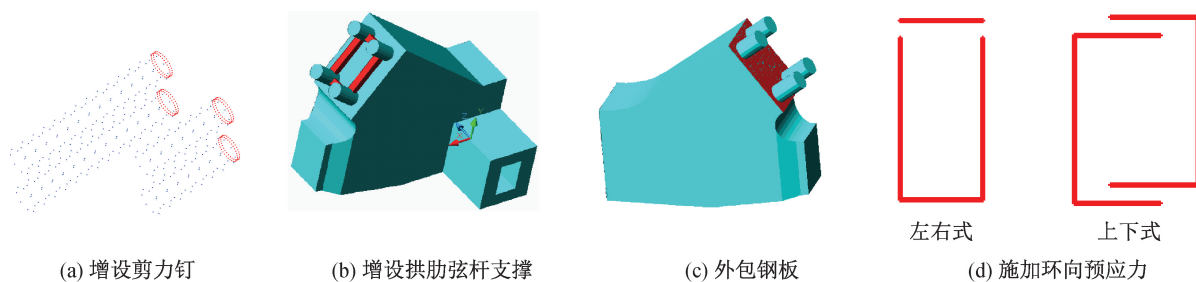


图 6 裂缝控制措施方案

Fig. 6 Schemes of crack control measures

(1) 增厚外包混凝土厚度:取 250、300、350、400 和 450 mm 五种。

(2) 增设剪力钉:在靠近拱脚混凝土顶面处增设 2 层剪力钉,以加强弦杆与混凝土的连接,每层布置的剪力钉增设至 32 个,其长度、直径仍与原剪力钉相同;第 1 层距离拱脚混凝土顶面 50 mm,增设的各层剪力钉之间及其与原剪力钉之间间距均为 100 mm。

(3) 增设拱肋弦杆支撑:在距拱脚混凝土顶面 200 mm 处相邻弦杆之间设置 4 根拱肋弦杆支撑,其材料与弦杆相同;宽度为 430 mm,高度为 400 mm,两根长 2 260 mm,另两根长 760 mm。

(4) 外包钢板:在拱脚混凝土顶面布置一块长宽与拱脚混凝土顶面尺寸相同、厚 25 mm 的钢板,并与钢管焊接连接。

(5) 施加环向预应力:在下弦钢管插入拱脚的范围内沿垂直拱轴方向布置环向预应力筋。预应力筋形式包括左右式和上下式。虽然左右式预应力筋长度大、预应力损失容易控制,但试算后发现,

由于上表面预应力筋数量为侧面的 2 倍,在减小拱脚混凝土上表面的拉应力的同时,使侧面产生了较大拉应力,因此左右式无法满足要求。故采用上下式预应力筋布置形式,以直线预应力筋控制拱脚混凝土上表面拉应力,U 型预应力筋控制拱脚混凝土侧面拉应力。

经多方案试算对比发现:当上表面直线预应力筋采用直径 32 mm 的 PSB830 预应力螺纹钢(有效预应力取为 530 MPa),侧面 U 型预应力筋采用直径 15.2 mm 的钢绞线($f_{pk} = 1\ 860$ MPa,有效预应力取为 1 110 MPa)时预应力较为协调。在弦杆混凝土保护层厚度为 250 或 300 mm 时,预应力筋布置方案为 $\Phi^{PS} 32@200 + \Phi^s 15.2-6@400$;弦杆混凝土保护层厚度为 350、400 或 450 mm 时,预应力筋布置方案为 $\Phi^{PS} 32@250 + \Phi^s 15.2-6@500$ 。

3.2 裂缝控制原则

按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—018)^[14],拱桥拱脚为钢筋混

凝土构件和 B 类预应力混凝土构件,允许开裂,在 I 类一般环境下最大裂缝宽度限值分别为 0.10 和 0.20 mm。但拱脚为非杆系结构,其裂缝宽度难以计算,因而文献[1]建议通过控制混凝土拉应力进行裂缝控制,本文也采取同样方法,通过满足混凝土拉应力限值来控制裂缝宽度。

JTG 3362—2018 规范规定,拉应力不超过限值的 A 类预应力构件在作用效应频遇组合下受拉边缘法向应力应满足:

$$\sigma_{st} - \sigma_{pc} \leq 0.7f_{tk} \quad (1)$$

《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)^[16]规定,在作用效应标准组合下二级裂缝控制的预应力构件受拉边缘法向应力应满足:

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0.7\gamma f_{tk} \quad (2)$$

式中: f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值, γ 为受拉区混凝土塑性影响系数。

温度梯度作用下,拱脚混凝土应变梯度较大,因此考虑受拉区混凝土塑性影响系数 γ 是合理的。考虑到:(1)气温骤降作用取 3 天降温 18℃,降温幅度取值较大,出现概率小;(2)拱桥拱脚是允许开裂的,拉应力限值可以放松;(3)混凝土开裂后温度应力迅速释放,如《升船机设计规范》(GB 51177—2016)^[17]就规定裂缝宽度验算时可取 0.5~0.6 的温度效应折减系数。本文建议受拉边缘法向应力按 0.7 折减,则温度梯度作用下抗裂要求放宽为:

$$f_{ck} - \sigma_{pc} \leq \gamma f_{tk} \quad (3)$$

其中, γ 按照偏心受拉构件取用,考虑到抗裂验算时截面上混凝土平均应力 $\sigma_m > 0$,取 $\gamma = \gamma_m - (\gamma_m - 1)\sigma_m/f_{tk}$ 。 γ_m 为截面抵抗矩的塑性系数,按受弯构件塑性系数的最小值 1.35 取用。并取截面

平均拉应力与允许抗拉强度比值为 0.5,即 $\frac{N_k}{A_0 f_{tk}} =$

0.5。则 $\gamma = \gamma_m - (\gamma_m - 1) \frac{N_k}{A_0 f_{tk}} = 1.175$ 。因此,

对施加预应力的拱脚混凝土应力控制条件取: $\sigma_{st} - \sigma_{pc} \leq \gamma f_{tk} = 3.10$ MPa,即混凝土拉应力应满足 $\sigma_{1max} \leq 3.10$ MPa。

3.3 各控裂措施的效果分析

根据表 2 所列的 4 种工况,采用 5 种控裂措施,共设计了 27 套方案进行 108 种组合的拱脚混凝土应力分析,得到的最大主拉应力 σ_{1max} 如表 4 所示。拱脚外包混凝土厚度取 250 mm 时,增设不同控裂措施后拱脚混凝土在 4 种工况下的最大主

拉应力 σ_{1max} 如图 7 所示。工况 2-1(均匀升温+日照)和工况 2-2(均匀降温+气温骤降)下,增设不同控裂措施后拱脚混凝土的最大主拉应力 σ_{1max} 随外包混凝土厚度的变化如图 8 所示。

表 4 增设不同控裂措施后拱脚混凝土最大

主拉应力 σ_{1max} (单位:MPa)

Tab. 4 Maximum principal tensile stress σ_{1max} of concrete at arch foot after adding different crack control measures

方案 编号	外包混凝土 厚度/mm	控裂措施	工况			
			1-1	1-2	2-1	2-2
1	250	原结构	5.27	2.07	6.04	5.16
2	250	剪力钉	4.23	1.97	5.48	5.05
3	250	拱肋弦杆支撑	1.71	1.91	5.41	5.02
4	250	钢板	2.51	1.74	6.48	4.61
5	250	预应力	2.58	0.30	0.66	2.87
6	250	预应力+剪力钉	1.85	0.29	0.66	2.84
7	300	原结构	4.28	1.91	6.14	5.00
8	300	剪力钉	3.39	1.82	5.61	4.88
9	300	拱肋弦杆支撑	1.62	1.79	5.54	4.90
10	300	钢板	2.38	1.71	6.11	4.56
11	300	预应力	1.92	0.28	0.64	2.91
12	300	预应力+剪力钉	1.29	0.28	0.62	2.90
13	350	原结构	3.58	1.71	5.62	4.73
14	350	剪力钉	2.78	1.66	5.19	4.64
15	350	拱肋弦杆支撑	1.56	1.66	5.42	4.52
16	350	钢板	2.25	1.52	6.10	4.30
17	350	预应力	1.65	0.16	0.63	3.03
18	400	原结构	3.13	1.47	5.39	4.42
19	400	剪力钉	2.36	1.44	5.02	4.43
20	400	拱肋弦杆支撑	1.49	1.40	5.24	4.35
21	400	钢板	2.14	1.41	6.04	4.09
22	400	预应力	1.47	0.14	0.59	2.92
23	450	原结构	2.81	1.32	5.09	4.34
24	450	剪力钉	2.15	1.30	4.93	4.35
25	450	拱肋弦杆支撑	1.42	1.29	5.19	4.32
26	450	钢板	2.15	1.41	5.71	4.10
27	450	预应力	0.88	0.12	0.59	3.04

由表 4 及图 7、图 8 可知,仅考虑荷载和均匀温度作用时(工况 1-1 和工况 1-2),各措施均可明显降低混凝土拉应力。考虑温度梯度作用后(工况 2-1 和工况 2-2)有:(1)仅增厚外包混凝土厚度已不能满足拉应力控制要求。(2)日照作用下, σ_{1max} 位置内移,而增设的剪力钉仅对拱脚顶面附近混凝土应力影响较大,对 σ_{1max} 影响较小,单独使用时无法满足拉应力控制要求。(3)由于钢材导热系数和导温系数较大,日照作用下布置的拱肋弦杆支撑或钢板升温大于内部混凝土,带动拱肋产生相互远离的变形,挤压外包混凝土,反而增

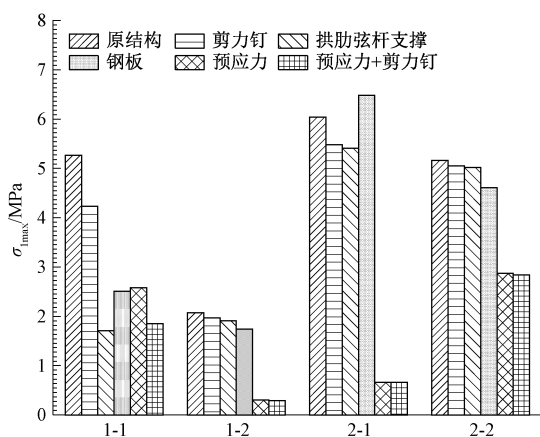
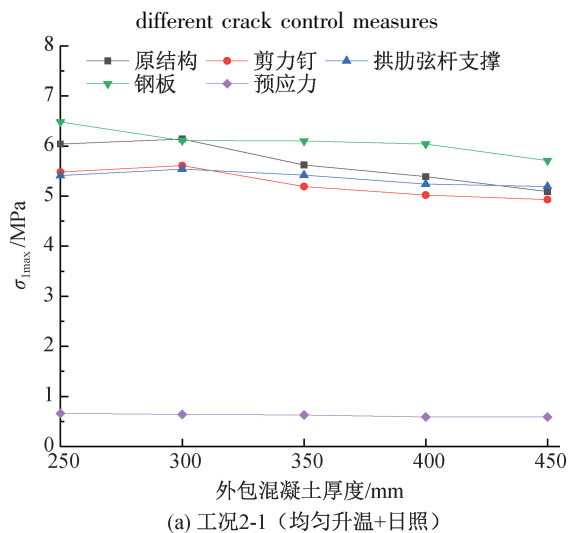
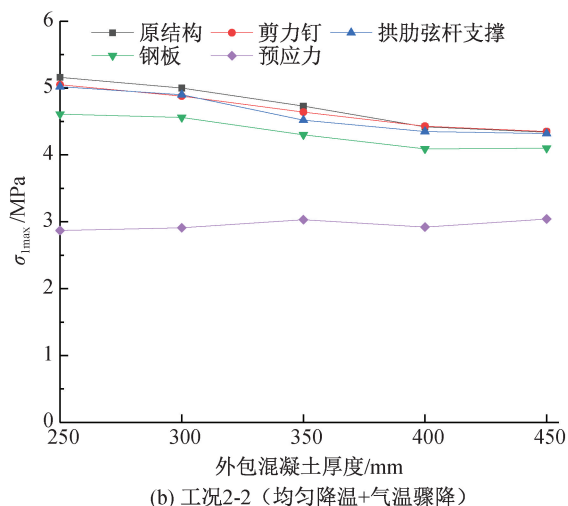


图 7 增设不同控制措施后拱脚混凝土在 4 种工况下的最大主拉应力 $\sigma_{1\max}$

Fig. 7 Maximum principal tensile stress $\sigma_{1\max}$ of concrete at arch foot under four working conditions after adding



(a) 工况 2-1 (均匀升温+日照)



(b) 工况 2-2 (均匀降温+气温骤降)

图 8 增设不同控制措施后拱脚混凝土最大主拉应力 $\sigma_{1\max}$ 随外包混凝土厚度的变化

Fig. 8 Variation of maximum principal tensile stress $\sigma_{1\max}$ of concrete at arch foot with surrounding concrete after adding different crack control measures

大混凝土拉应力。(4)施加预应力后,气温骤降作用下 $\sigma_{1\max}$ 值明显小于其它措施。外包混凝土厚度取 350、400 或 450 mm 时,仅施加预应力即可满足拉应力控制要求。可见施加预应力是减小混凝土拉应力的最有效措施。(5)施加预应力的同时增设剪力钉,外包混凝土厚度取 250 或 300 mm 均可满足拉应力控制要求。

综上所述,施加预应力+增设剪力钉、施加预应力+增厚外包混凝土厚度两种组合控裂方案效果最为明显。针对姚湾东南公路桥拱脚混凝土抗裂问题,可在下面两个具体方案中选择:(1)外包混凝土厚度仍取 250 mm,在下弦钢管插入拱脚范围内,沿拱轴方向布置 $\Phi^{PS} 32@200+\Phi^s 15.2-6@400$ 预应力筋,同时靠近拱脚混凝土顶面处增设 2 层剪力钉。(2)增厚外包混凝土厚度至 350 mm,同时在下弦钢管插入拱脚范围内,沿拱轴方向布置 $\Phi^{PS} 32@250+\Phi^s 15.2-6@500$ 预应力筋。

4 结论

1)日照和气温骤降对拱脚混凝土拉应力影响显著,抗裂设计应考虑其作用。

2)日照作用下,拱肋弦杆支撑或钢板会增大混凝土拉应力。施加预应力是减小混凝土拉应力的最有效措施;单独采用施加预应力、增厚外包混凝土厚度或增设剪力钉等措施均不能满足混凝土裂缝控制要求。

3)施加预应力+增设剪力钉和施加预应力+增厚外包混凝土厚度在各工况下均表现了较优抗裂效果,本文推荐选用。

参考文献:

- [1] 杜国鹏,李杰,贺铮.某梁拱组合桥施工中拱脚裂缝成因分析及处理措施[J].交通科技,2020(5):47-51.
- [2] 范家怡,赵胤儒,汪基伟.钢管混凝土拱桥拱脚混凝土最小厚度研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2018,40(1):48-53.
- [3] 邓风亭.下承式钢管混凝土系杆拱桥拱脚裂缝及其控制对策研究[D].南京:东南大学,2016.
- [4] 李前名.预应力混凝土箱梁桥温度场及温度应力的分析与研究[D].成都:西南交通大学,2006.
- [5] 任翔.混凝土桥塔温变效应及开裂机理研究[D].西安:长安大学,2009.
- [6] 刘永健,刘江,张宁.桥梁结构日照温度作用研究综述[J].土木工程学报,2019,52(5):63-82.

(下转第 79 页)

- [6] Ng C W W, LIU G B, LI Q. Investigation of the Long-Term Tunnel Settlement Mechanisms of the First Metro Line in Shanghai[J]. Can Geotech J, 2013, 50(6): 674-684.
- [7] 黄广龙, 卫敏, 韩爱民, 等. 南京长江漫滩地层中地铁结构的沉降分析[J]. 水文地质工程地质, 2006(3): 118-122.
- [8] 黄广军. Asaoka 法预测软土地基沉降时存在的问题和对策[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1061-1065.
- [9] 杨涛, 李国维, 杨伟清. 基于双曲线法的分级填筑路堤沉降预测[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 4.
- [10] 赵新铭, 刘浩, 杨涛, 等. 淤泥质土堤防沉降预测方法的对比分析[J]. 人民长江, 2016, 047(17): 93-97.
- [11] 潘林有, 谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学, 2004(7): 45-50.
- [12] TB 10304—2020, 铁路隧道工程施工安全技术规程[S].
- [13] 梅国雄, 宋林辉, 宰金珉. 地下水浮力折减试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1476-1480.
- [14] DBJ 11-501—2009, 北京地区建筑地基基础勘察设计规范[S].
- [15] 孙红, 赵锡宏, 杨群兴. 软土的弹塑性损伤模型在 Biot 固结有限元中应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 4.
- [16] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 141-153.
- [17] GB/T 51064—2015, 吹填土地基处理技术规范[S].

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 63 页)

- [11] 曾芮, 姜明顺, 孙琳旭, 等. 强降雨条件下岩质边坡倾倒塌破坏机理——以鄂西赵家岩崩塌为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 12-17.
- [12] 张勃成, 唐辉明, 申培武, 等. 基于岩石损伤与水力作用的顺层岩质边坡临界失稳高度研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 42-49.
- [13] 张金龙, 徐卫亚, 金海元, 等. 大型复杂岩质高边坡安全监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1819-1827.
- [14] 沈强, 陈从新, 汪稔, 等. 边坡抗滑桩加固效果监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(6): 934-938.
- [15] 陈强, 韩军, 艾凯. 某高速公路山体边坡变形监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(2): 299-302.
- [16] 陈志坚, 刘大伟, 张雄文. 水压力传感器系统在河床冲刷深度实时监控中的应用研究[J]. 中国工程科学, 2007(5): 17-21.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 70 页)

- [7] 聂利芳, 王新国, 周继, 等. 考虑温度效应的混凝土索塔锚固段应力分析[J]. 公路, 2019, 064(4): 110-114.
- [8] 念良宏, 王龙, 张柳煜. 寒潮作用对混凝土 T 梁的影响[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2019(1): 174-176.
- [9] 孙国富. 大跨度钢管混凝土拱桥日照温度效应理论及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [10] 汪鹤. 钢管混凝土拱桥日照温度场及效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [11] 姜自奇, 刘兵伟, 陈艳阳, 等. 变截面钢管混凝土桁架拱桥拱脚应力分析及抗裂预防措施[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 180-184.
- [12] 汪基伟, 唐亮, 范家怡, 等. 带埋置弹簧界面单元模型研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2019, 47(2): 125-130.
- [13] 巫昌海, 汪基伟. 混凝土三维钢筋埋置组合式有限单元模型及其网格自动生成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(10): 761-764.
- [14] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [15] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [16] DL/T 5057—2009, 水工混凝土结构设计规范[S].
- [17] GB 51177—2016, 升船机设计规范[S].

(责任编辑 周雪梅)