DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.029

大跨PC连续刚构桥主梁温度梯度下的应力分析

蒋赣猷[1]，周群[2]，陈光辉[2]
（1.广西路桥工程集团有限公司，广西 南宁 530000；2.广西路桥集团勘察设计有限公司）

摘要：为深入研究大跨PC连续刚构桥主梁温度梯度下的应力状况，以某(45＋2×80＋45) m大跨PC连续刚构桥为工程背景，分别分析了混凝土铺装和沥青铺装下不同顶板厚及不同铺装层厚主梁温度梯度下的应力状况。研究结果表明：① 同等条件下混凝土铺装产生的温度梯度应力为沥青铺装的1.3～1.8倍；② 主梁顶板厚度变化对其温度梯度应力影响很小；③ 一定厚度范围内的沥青铺装，主梁温度梯度应力随铺装层厚度增加而减小，厚度增加1 cm其正温差工况温度梯度应力减少0.4 MPa左右，负温差工况温度梯度应力减少0.2 MPa左右；④ 沥青铺装层厚度增加，其温度梯度应力减少值较其自重应力增加值要大，单从温度梯度应力方面考虑，较厚的沥青铺装可使主梁应力状态更优，综合考虑施工方便、经济合理等因素，沥青铺装以8～9 cm为宜。

关键词：PC连续刚构桥；混凝土铺装；沥青铺装；顶板厚度；铺装层厚度；温度梯度应力

大跨PC连续刚构桥凭借其受力合理、行车舒适、施工方便、跨越能力大且养护费用少等优点在中国桥梁建设中得到了广泛的应用。然而，国内外由于温度效应而导致主梁开裂的问题层出不穷，主要是由于混凝土较差的传热性能，导致主梁在日照辐射等环境影响下，其内部温度变化滞后于外部温度变化而引起主梁内部温度沿竖向呈非线性分布，从而产生温度梯度应力导致开裂破坏。研究表明：不同国家、不同地区、不同行业等，结构计算时所选取的竖向温度梯度分布模式不一样，这也造成了同一座桥梁计算所得温度梯度应力相差很大。然而，对于同一竖向温度梯度分布模式，对不同顶板厚、不同铺装类型和铺装层厚大跨PC连续刚构桥主梁温度梯度下的应力状况的研究较少。因此，为了更加深入研究不同情况下大跨PC连续刚构桥主梁温度梯度下的应力状况，该文以某(45＋2×80＋45) m大跨PC连续刚构桥为工程背景，建立有限元模型，分别分析混凝土铺装和沥青铺装下不同顶板厚及不同铺装层厚主梁温度梯度下的应力状况。

1 工程背景简介及有限元模型建立

1.1 工程背景简介

该桥为四跨PC混凝土连续刚构桥，桥跨布置为(45＋2×80＋45) m，上构主梁为单箱单室箱梁，其一般横断面如图1所示，桥面宽12.5 m，跨中顶板厚28 cm，支点梁高5.1 m，跨中合龙段及边跨现浇段梁高4.6 m，箱梁变高度段按二次抛物线变化，采用悬臂现浇施工，主梁采用C55混凝土。下构为双肢薄壁墩，纵桥向中心间距4 m，基础采用桩基础。

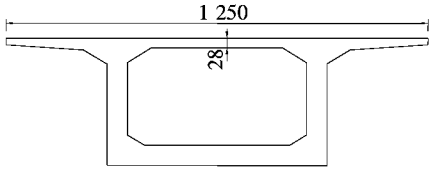

图1 主梁一般横断面图(单位：cm)

桥面铺装采用8 cm C50混凝土调平层＋9 cm沥青铺装，沥青铺装分4 cm＋5 cm两层铺设。

1.2 有限元模型建立

以桥梁最左端为结构纵桥向坐标原点，采用最新桥梁博士V4.0建立结构整体有限元模型，上构主梁为C55混凝土，下构主墩为C40混凝土。全桥共划分为140个梁单元，其中上构110个梁单元，下构30个梁单元。

2 竖向温度梯度分布模式的选取

选取JTG D60－2015《公路桥涵设计通用规范》定义的公路桥梁竖向温度梯度分布模式对主梁进行加

收稿日期：2019－03－13

作者简介：蒋赣猷，男，大学本科，高级工程师，E－mail:2787806@qq.com

载，具体分布如图 2 所示。

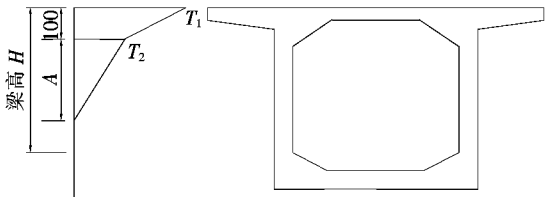

图 2 竖向温度梯度分布模式(单位：mm)

图 2 中，T_1 为主梁顶面温度值，T_2 为主梁顶面以下 100 mm 处温度值；当梁高 $H \geqslant 400$ mm 时，$A=300$ mm，当梁高 $H<400$ mm 时，$A=H-100$ mm，竖向日照正温差 T_1、T_2 数值如表 1 所示。

表 1 竖向日照正温差计算的温度基数

结构类型	T_1/℃	T_2/℃
水泥混凝土铺装	25	6.7
50 mm 沥青铺装	20	6.7
100 mm 沥青铺装	14	5.5

竖向日照反温差 T_1、T_2 为正温差乘以 −0.5，沥青铺装层厚小于 50 mm 取 50 mm，大于 100 mm 取 100 mm，位于中间值则按厚度进行内插。

由图 2 及表 1 分析可知：主梁温度梯度应力与梁高、顶板厚、铺装类型、铺装厚度等息息相关，大跨 PC 连续刚构桥主梁一般为箱梁，梁高远大于 400 mm。因此，下文将重点对混凝土铺装和沥青铺装下不同顶板厚及不同铺装层厚主梁温度梯度下的应力状况进行分析。

3 混凝土铺装主梁温度梯度下的应力分析

3.1 不同顶板厚主梁温度梯度下的应力分析

据统计，国内外现代已建造的大跨 PC 连续刚构桥顶板厚(该文均指顶板跨中厚度，下同)一般为 25～32 cm，故该文选取 26、28、30、32 cm 共 4 组顶板厚，桥面铺装厚为 17 cm(同背景工程)，分析混凝土铺装主梁温度梯度下的应力状况。

背景工程主梁为纵向完全对称结构，因此，在进行主梁应力分析时只选取其 1/2 结构进行分析。根据图 2 的温度梯度分布模式对背景工程进行温度加载，改变顶板厚得到正反温差工况下主梁 1/2 结构上缘温度梯度应力分布如图 3、4 所示，使用阶段主梁 1/2 结构上缘最小、最大应力如图 5、6 所示。

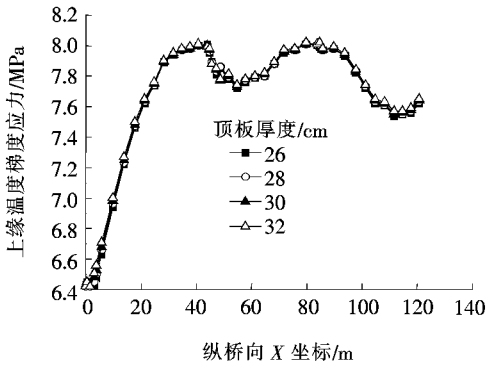

图 3 正温差主梁 1/2 结构上缘温度梯度应力分布图

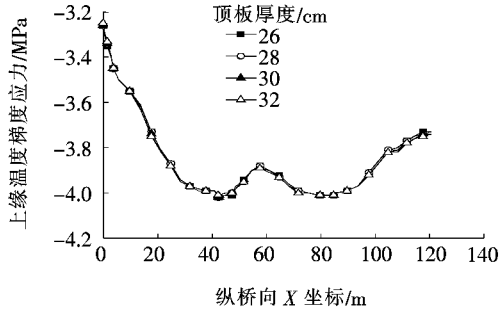

图 4 反温差主梁 1/2 结构上缘温度梯度应力分布图

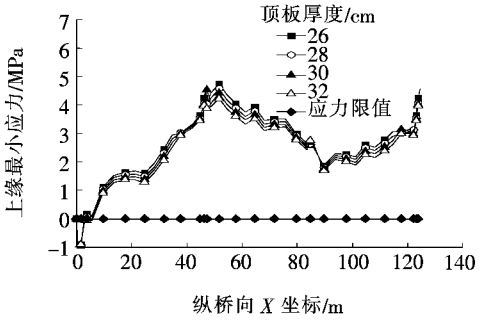

图 5 主梁 1/2 结构上缘最小应力分布图(频率组合)

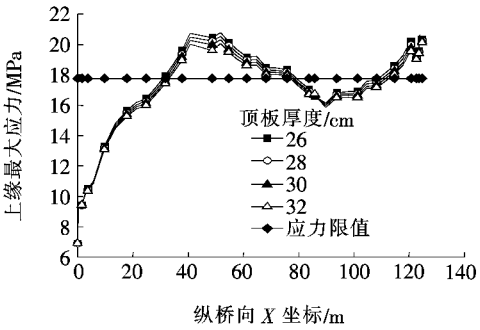

图 6 主梁 1/2 结构上缘最大应力分布图(标准组合)

根据 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》第 6.3.1 条及第 7.1.5 条，该悬浇施工主梁正截面最小应力(频率组合下拉应力，下

同）限值为 0 MPa，正截面最大应力（标准组合下压应力，下同）限值为 0.5×35.5＝17.75 MPa。

由图 3～6 可知：① 顶板厚度变化对其温度梯度应力影响很小；② 主梁采用混凝土铺装其正温差工况下上缘温度梯度应力为 7.8 MPa 左右，最大值为 8.0 MPa，负温差工况下上缘温度梯度应力为－3.9 MPa 左右；最小值为－4.1 MPa；③ 主梁支点附近上缘压应力超限基本在 3.1 MPa 以上，拉应力仅有 3.5 MPa 左右的富余，可见较难通过调整预应力束同时使主梁上缘压应力和拉应力满足规范要求，勉强满足主梁也将处在一个较差的应力状态，这也是大跨 PC 连续刚构桥主梁一般不采用混凝土铺装的原因。

3.2　不同铺装层厚主梁温度梯度下的应力分析

由前文分析可知：顶板厚度变化对其温度梯度应力影响很小，且由表 1 可知：主梁温度梯度应力与混凝土铺装厚度无关，故下文选取主梁顶板厚为 28 cm，混凝土铺装厚为 15、16、17、18 cm（均含调平层厚），分析不同铺装层厚主梁上缘应力状况，计算结果如图 7、8 所示。

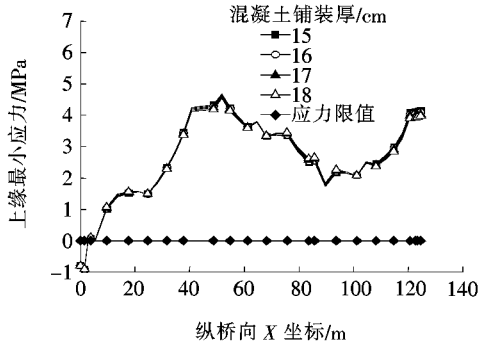

图 7　主梁 1/2 结构上缘最小应力分布图（频率组合）

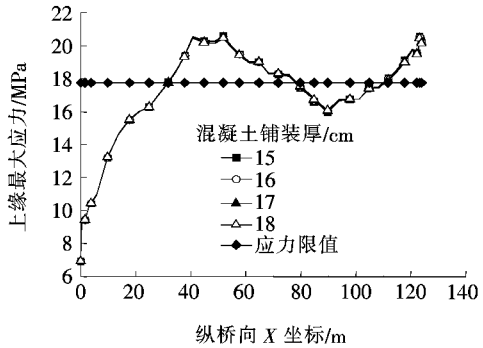

图 8　主梁 1/2 结构上缘最大应力分布图（标准组合）

由图 7、8 可知：铺装层越厚，主梁承受荷载越大，主梁上缘应力越大，但应力变化很小。

由上分析可知：主梁顶板厚度变化对其温度梯度应力影响很小，混凝土铺装层厚度变化对主梁上缘应力影响也很小，然而由于混凝土铺装过大的温度梯度应力使得大跨 PC 连续刚构桥在应力验算中难以满足规范要求，因此，实际工程中一般采用温度梯度应力较小的沥青铺装，下文将对沥青铺装主梁温度梯度下的应力状况进行分析，并与混凝土铺装的应力状况进行对比。

4　沥青铺装主梁温度梯度下的应力分析

4.1　不同顶板厚主梁温度梯度下的应力分析

为与混凝土铺装对比，同样选取 26、28、30、32 cm 共 4 组顶板厚分析沥青铺装主梁温度梯度下的应力状况，桥面铺装采用 8 cm C50 混凝土调平层＋9 cm 沥青铺装（同背景工程）。由此可得正反温差工况下主梁 1/2 结构上缘温度梯度应力分布如图 9、10 所示，使用阶段主梁 1/2 结构上缘最小、最大应力如图 11、12 所示。

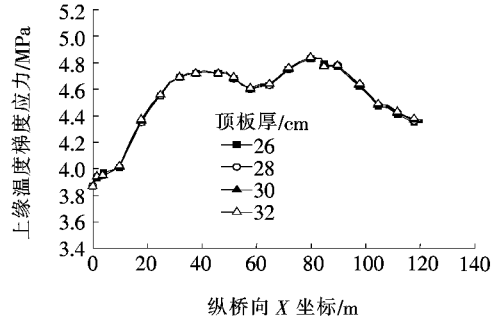

图 9　正温差主梁 1/2 结构上缘温度梯度应力分布图

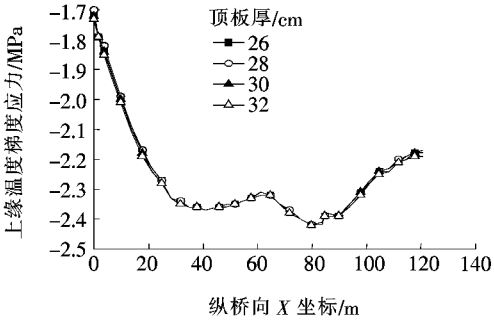

图 10　反温差主梁 1/2 结构上缘温度梯度应力分布图

由图 9～12 可知：① 顶板厚度变化对其温度梯度应力影响很小；② 主梁采用 9 cm 沥青铺装其正温差工况下上缘温度梯度应力为 4.6 MPa 左右，最大值为 4.8 MPa，负温差工况下上缘温度梯度应力为－2.3 MPa 左右；最小值为－2.4 MPa；③ 在该铺装厚度下，两种铺装在主梁上缘产生的温度应力比大致为一定值，混凝土铺装为沥青铺装的 1.7 倍；④ 主梁上缘压

应力至少有 1 MPa 富余，拉应力基本有 3 MPa 以上的富余，主梁处在一个较好的应力状态，这也是大跨 PC 连续刚构桥主梁一般采用沥青铺装的原因。

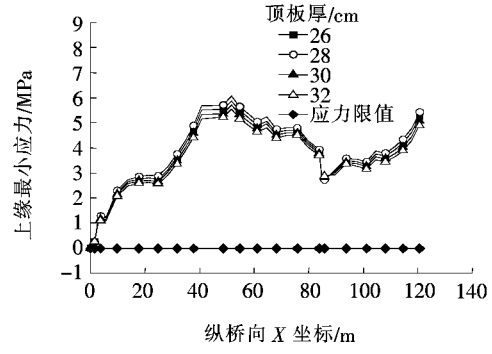

图 11 主梁 1/2 结构上缘最小应力分布图(频率组合)

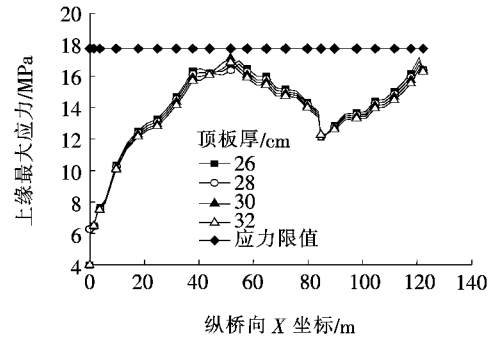

图 12 主梁 1/2 结构上缘最大应力分布图(标准组合)

4.2 不同铺装层厚主梁温度梯度下的应力分析

为与混凝土铺装形成对比，选取主梁顶板厚为 28 cm，沥青铺装层厚分别为 7、8、9、10 cm，C50 混凝土调平层均为 8 cm，分析不同沥青铺装层厚主梁温度梯度下的应力状况。

根据图 2 的温度梯度分布模式进行温度加载(T_1、T_2 按厚度内插)，改变铺装层厚度，得正反温差工况下主梁 1/2 结构上缘温度梯度应力分布如图 13、14 所示，使用阶段主梁 1/2 结构上缘最小、最大应力分布如图 15、16 所示。

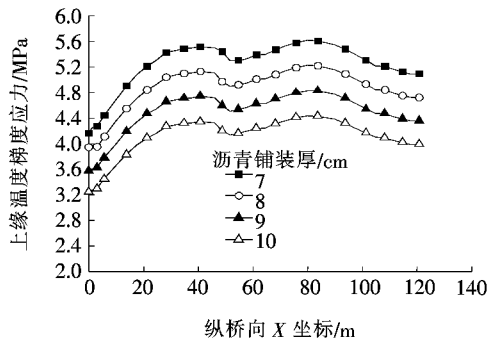

图 13 正温差主梁 1/2 结构上缘温度梯度应力分布图

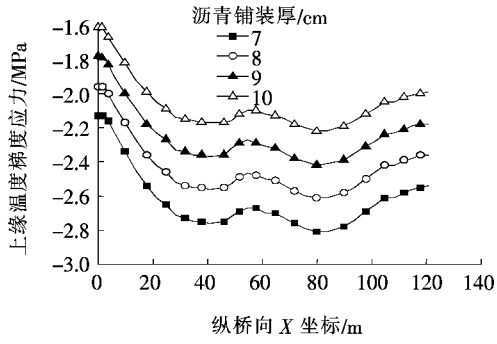

图 14 反温差主梁 1/2 结构上缘温度梯度应力分布图

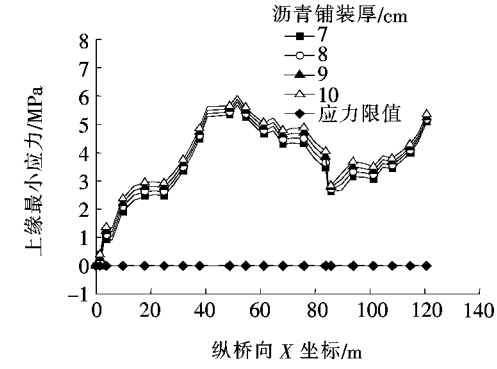

图 15 主梁 1/2 结构上缘最小应力分布图(频率组合)

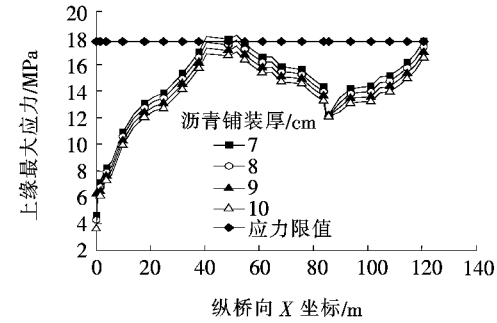

图 16 主梁 1/2 结构上缘最大应力分布图(标准组合)

由图 13～16 可知：① 一定厚度范围内(5～10 mm)的沥青铺装，主梁温度梯度应力随铺装层厚度增加而减小，厚度增加 1 cm 其正温差工况温度梯度应力减少0.4 MPa 左右，负温差工况温度梯度应力减少0.2 MPa 左右；② 沥青铺装层越薄，主梁上缘拉、压应力富余值越小，这表明沥青铺装层厚度增加时，其温度梯度应力减少值较其自重应力增加值要大，因此，单从温度梯度应力方面考虑，较厚的沥青铺装可使主梁应力状态更优，综合考虑施工方便、经济合理等因素，沥青铺装以 8～9 cm 为宜。

5 结论

(1) 同等条件下混凝土铺装产生的温度梯度应力

DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.030

外倾式矮塔斜拉桥墩塔设计实践

李春
（广西交通设计集团有限公司，广西 南宁 530029）

摘要：崇左市崇左大桥为一座(105＋190＋105) m＝400 m外倾式桥塔PC矮塔斜拉桥，墩塔轮廓呈双手托举造型。该桥受到通航及起终点标高限制，为实现桥梁景观造型，在结构设计上采用了塔墩梁固结体系、双肢实体桥墩、钢箱混凝土桥塔等关键技术。为探求墩塔的力学性能，运用Midas/Civil有限元软件建立了全桥的杆系模型，并采用Midas FEA有限元软件对塔墩梁结合部实体结构进行数值模拟。分析结果表明：桥梁结构选型合理、结构受力性能与经济指标良好。对外倾式桥塔斜拉桥墩塔结构进行了有益的探索。

关键词：外倾式矮塔斜拉桥；双肢实体桥墩；墩塔设计；力学性能

1 工程概况

广西崇左大桥是一座城市标志性景观桥梁，该桥为外倾式桥塔PC矮塔斜拉桥，跨径布置为(105＋190＋105) m＝400 m，桥面宽39 m，主梁根部梁高8 m，跨中梁高3.5 m，梁高按1.8次抛物线变化。桥塔景观呈双手托举造型(图1)，桥梁造型优美。但该桥在设计中面临着桥梁跨度大、桥面宽、桥面高程受限、结构受力复杂等技术难题。

针对该桥的技术特点，该文从结构体系选型、墩塔

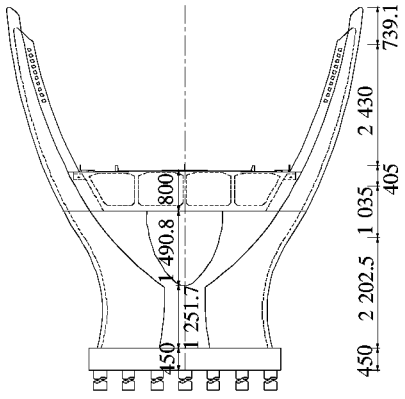

图1 桥塔立面构造图(单位：cm)

为沥青铺装的1.3～1.8倍。

(2) 主梁顶板厚度变化对其温度梯度应力影响很小，且板厚变化值有限，故刚构桥设计中不建议通过改变顶板厚来改善主梁温度梯度应力。

(3) 一定厚度范围内的沥青铺装，主梁温度梯度应力随铺装层厚度增加而减小，厚度增加1 cm其正温差工况温度梯度应力减少0.4 MPa左右，负温差工况温度梯度应力减少0.2 MPa左右。

(4) 沥青铺装层厚度增加，其温度梯度应力减少值较其自重应力增加值要大，单从温度梯度应力方面考虑，较厚的沥青铺装可使主梁应力状态更优，综合考虑施工方便、经济合理等因素，沥青铺装以8～9 cm为宜。

参考文献：

[1] 姚玲森.桥梁工程[M].北京：人民交通出版社，2008.
[2] 武晓宇，杨永清.混凝土连续刚构桥主梁在温度梯度下结构效应研究[J].四川建筑，2018(4).
[3] 李葳.国内外规范关于竖向温度梯度的规定研究[J].中国铁路，2017(9).
[4] 李金云.大跨组合连续梁桥不同温度梯度模式的效应研究[J].公路交通科技：应用技术版，2018(8).
[5] 庞振宇，徐秀丽，邢世玲.城市混凝土曲线梁桥温度场及温度效应分析[J].中外公路，2016(1).
[6] 孙金，冯小青，唐焱.高温沥青摊铺时钢－混叠合梁桥温度场有限元分析[J].中外公路，2018(3).
[7] JTG D60－2015 公路桥涵设计通用规范[S].
[8] JTG 3362－2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

收稿日期：2018－12－28

作者简介：李春，男，大学本科，高级工程师.E－mail:1176036554@qq.com