

## 铺装层厚度对钢—混叠合梁桥温度效应影响分析

王达<sup>1,2</sup>, 谢文文<sup>1</sup>, 段宇<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004;

2.桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**以某三跨连续钢—混叠合梁桥为工程背景,应用有限元软件 ANSYS 计算分析中、美竖向温度规范下铺装层厚度对主体结构温度效应的影响及中国规范中铺装层的受力情况。结果表明,两国规范中正温度梯度下结构的拉应力最大值均出现在工字梁,且在正、负温度梯度转变时拉应力比压应力变化明显;砼桥面板除在美国规范负温度梯度作用下拉应力不超过 C50 容许强度外,其他均大于自身设计抗拉强度;中国规范下铺装层温度效应产生的拉、压应力最大值均小于其容许强度;结构各部位温度产生的效应差距较大。

**关键词:**桥梁;钢—混叠合梁桥;砼桥面板厚度;温度效应;温度梯度

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2018)05-0106-03

钢—混叠合梁桥因材料的属性差异,在环境中结构各部位温度相差较大、结构受力复杂,加大对该类桥型温度效应的研究相当必要。陈彦江等对钢—混梁桥的温度场和温度效应进行研究,发现桥面板与钢梁接触的局部范围内存在较大差别,实测温度场拟合的温度梯度与规范有所差别;卢傲等提出应重视梯度温度对桥面板的影响;项贻强等考虑桥的竖、横向温度梯度进行分析,发现温度会产生较大的拉应力,降低主梁截面抗裂性能;王达等研究发现钢—混组合桥面系竖向温度梯度效应明显,产生的应力不容忽视。桥梁结构产生温差的大小影响钢—混组合梁桥的结构受力,而日照等自然温度变化直接作用于铺装层,铺装层厚度、材料属性将影响结构的温度走势。该文以某钢—混叠合梁为背景,运用有限元软件 ANSYS 计算不同厚度铺装层下中、美规范的温度效应,分析结构各部分的受力及两规范下温度效应差异,为同类型桥梁设计中铺装厚度选取提供参考。

## 1 规范温度梯度模型及取值

### 1.1 中国规范温度取值

选用 JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》,控制位置的温度取值以基准温度采用线性内插法求得。钢—混组合结构和砼结构的负温梯度为正温度梯度的-0.5倍。对于砼结构,梁高  $A \geq 400$  mm 时,计算温度梯度时取  $A = 300$  mm;  $A < 400$  mm 时,计算温度梯度时  $A = (H - 100)$  mm。对于

带砼面板的钢—混组合梁结构,  $A = 300$  mm。规范给定的参数见表 1,温度梯度变化形式见图 1。

表 1 中国规范温度基数

结构类型	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$
砼铺装层	25	6.7
50 mm 沥青砼铺装层	20	6.7
100 mm 沥青砼铺装层	14	5.6

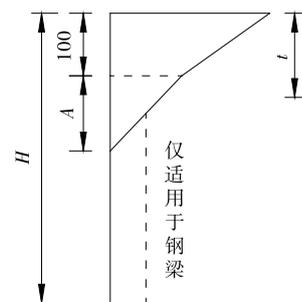


图 1 中国规范竖向温度梯度(单位:mm)

### 1.2 美国规范温度取值

美国 AASHTO 规范根据不同地理位置划分 4 个区域,规定每一区域的温度基数(见表 2)。在计算负温度梯度时,如桥面为素砼,温度取值为各区温度基数的-0.3倍;如桥面为沥青砼,温度取值为各区温度基数的-0.2倍。温度梯度变化形式见图 2。

表 2 美国规范温度基数

区域编号	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	区域编号	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$
1	30	7.8	3	23	6.0
2	25	6.7	4	21	5.0

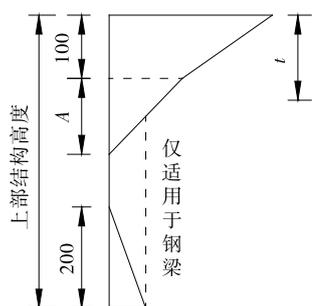


图2 美国规范竖向温度梯度(单位:mm)

## 2 有限元模型计算

### 2.1 有限元模型

以某三跨钢-混叠合连续梁桥为工程背景建立 ANSYS 全桥模型。该桥跨度为 35 m + 55 m + 35 m,总长 125 m。下纵梁为 4 根 Q345 工字钢,工字钢间采用同种钢材横向连接,梁高 2.4 m。桥面板为 C50 砼,最大处厚度 35 cm,桥面板与工字钢纵梁用剪力钉连接,桥面宽 15 m。铺装层采用细粒式沥青砼。建模时工字钢选用 Solid45 单元,砼桥面板和沥青铺装层选用 Solid65 单元。模型共 200 870 个节点、124 960 个单元。为模拟桥梁各部分之间的连接,模型采用节点耦合和共用节点的方式进行简化处理,以形成整体达到共同受力的状态。ANSYS 全桥模型见图 3。

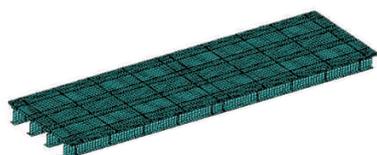


图3 ANSYS 全桥模型

为研究铺装层厚度变化对结构温度效应的影响,模型仿真计算中不考虑材料自重对结构的影响。分别计算 50、80、100 mm 铺装层厚度下的温度效应,对比分析两种规范计算结果的共性和差异。

### 2.2 控制位置温度值及材料参数

中、美规范中不同铺装层厚度控制位置正温度梯度取值采用线性插值方式计取。中国规范负温度梯度取为正温度梯度的 -0.5 倍;因该桥桥面为沥青砼铺装,美国规范负温度值取为正温度梯度的 -0.2 倍。中、美规范下正、负温度取值和材料参数选取见表 3~5。

### 2.3 计算结果及分析

50、80、100 mm 沥青铺装层厚度下中国规范正、负温度梯度应力计算结果见表 6、表 7,美国各区域正、负温度梯度应力计算结果见表 8、表 9。100 mm 沥青铺装层厚度下中国规范正、负温度梯度

表3 中国规范温度计算值

铺装层厚度/mm	正温度/°C	负温度/°C
50	20;3.35;1.12	-10;-1.68;-0.56
80	16.4;2.99;0.99	-8.2;-1.49;-0.49
100	14;2.75;0.92	-7;-1.38;0.46

表4 美国规范温度计算值

区域代码	正温度/°C	负温度/°C
1	30;3.9;1.3	-6;-0.78;-0.26
2	25;3.35;1.12	-5;-0.67;-0.22
3	23;3.0;1.0	-4.6;-0.6;-0.2
4	21;2.5;0.83	-4.2;-0.5;-0.17

表5 材料参数

材料名称	弹性模量/MPa	热传导率/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	线膨胀系数/°C <sup>-1</sup>	质量密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比
工字钢	2.06×10 <sup>11</sup>	58.20	1.2×10 <sup>-5</sup>	7 850	0.30
砼	3.55×10 <sup>10</sup>	2.50	1×10 <sup>-5</sup>	2 500	0.20
沥青	1.60×10 <sup>9</sup>	0.74	2×10 <sup>-5</sup>	2 400	0.25

应力云图见图 4、图 5,美国区域代码 4 的正、负温度梯度应力云图见图 6、图 7。

由表 6~7 可知:中国规范正温度梯度下,工字钢拉应力为 -4.42~ -5.51 MPa,压应力为 16.1~24 MPa;砼桥面的拉应力为 2.53~3.57 MPa,压应力为 -3.98~ -5.75 MPa。负温度梯度下,工字钢拉应力为 2.21~2.75 MPa,压应力为 -8.03~11.9

表6 中国规范正温度梯度计算应力

铺装层厚度/mm	各部位的正温度梯度计算应力/MPa					
	工字钢		砼		沥青铺装层	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
50	24.0	-5.51	3.57	-5.75	0.252	-0.702
80	19.2	-4.85	3.00	-4.67	0.197	-0.574
100	16.1	-4.42	2.53	-3.98	0.168	-0.489

表7 中国规范负温度梯度计算应力

铺装层 厚度/mm	各部位的负温度梯度计算应力/MPa					
	工字钢		砼		沥青铺装层	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
50	2.75	-11.90	2.90	-1.83	0.349	-0.126
80	2.42	-9.61	2.33	-1.50	0.287	-0.098
100	2.21	-8.03	1.99	-1.27	0.245	-0.089

表8 美国规范正温度梯度计算应力

区域代码	各部位的正温度梯度计算应力/MPa			
	工字钢		砼	
	最大值	最小值	最大值	最小值
1	37.1	-6.63	3.94	-8.70
2	30.8	-5.68	3.58	-7.38
3	28.5	-5.10	3.21	-6.81
4	26.3	-4.30	2.27	-6.26

表9 美国规范负温度梯度计算应力

区域代码	各部位的负温度梯度计算应力/MPa			
	工字钢		砼	
	最大值	最小值	最大值	最小值
1	1.33	-8.54	1.72	-1.12
2	1.14	-6.58	1.51	-0.93
3	1.05	-5.69	1.43	-0.86
4	0.94	-4.79	1.34	-0.78

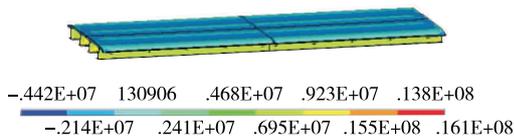


图4 中国规范 100 mm 铺装层正温度梯度应力(单位:Pa)

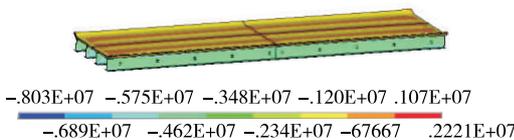


图5 中国规范 100 mm 铺装层负温度梯度应力(单位:Pa)

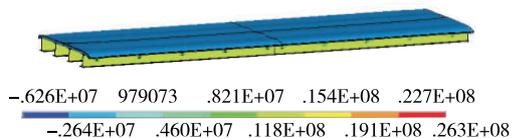


图6 美国规范区域代码4的正温度梯度应力(单位:Pa)

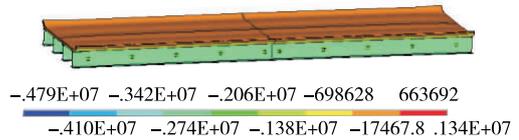


图7 美国规范区域代码4的负温度梯度应力(单位:Pa)

MPa;桥面板拉应力为 1.99~2.9 MPa,压应力为 -1.27~-1.83 MPa。中国规范正、负温度梯度中不同厚度铺装层温度效应产生的压应力最大值出现在钢梁,且结构各部位的拉、压应力与温度呈线性相关;工字钢承受的拉、压应力最大,其次是桥面板,沥青铺装层受力最小;两种温度梯度下,工字钢受的力均小于 Q345 钢材屈服强度;桥面板拉应力最小值为 1.99 MPa,大于 C50 砼抗拉容许强度,砼可能发生开裂;沥青砼所受拉、压应力最大值均小于其强度容许值。

由表 8~9 可知:美国规范正温度梯度下,工字钢拉应力为 -4.3~-6.63 MPa,压应力为 26.3~37.1 MPa;砼桥面拉应力为 2.27~3.94 MPa,压应力为 -6.26~-8.7 MPa。负温度梯度下,工字钢拉应力为 0.94~1.33 MPa,压应力为 -4.79~-8.54 MPa;砼桥面板拉应力为 1.34~1.72 MPa,压应力为 -0.78~-1.12 MPa。美国 4 个区域在规范正温度梯度下钢梁均出现拉应力最大情况,压应力最大出现在桥面板,各结构部位的拉、压应力与温度呈线性相关;负温度梯度产生的应力效应则相反。4 个区域中,虽然负温度效应产生的拉应力最大值小于砼抗拉强度,但在正温度效应下砼拉应力均大于其抗拉强度,砼桥面板仍可能出现开裂。

### 3 结论

(1) 中国规范下该钢-混叠合梁桥不同铺装层厚度的工字钢均产生拉应力最大值,且拉应力最大值基本出现在钢梁;美国规范并未出现相同的规律。中国规范温度效应下,工字钢出现最大应力,桥面板次之,沥青铺装层受力最小;而美国规范下正、负温度梯度的拉压应力最大值在工字钢和桥面板之间交叉出现。

(2) 温度梯度作用下结构产生的拉、压应力均与温度呈线性相关,桥面板可能出现开裂。

(3) 该钢-混叠合梁桥在中国规范下结构受力比美国规范受力均匀,且工字钢在正温度梯度下拉

(下转第 135 页)

由斜坡表面桩-土相对位移和图9可知:在一定深度范围内,桩-土相对位移随着地震波幅值的增大而增加;地震波幅值相同的条件下,P4桩-土相对位移比P3小,且两桩桩-土相对位移曲线的形状有所不同。这是因为砂土颗粒之间有孔隙、无黏性的岩土,土体进入塑性区时,桩与桩后土产生脱离,使桩间土提前进入破坏状态,导致P3桩前土抗力比P4桩前土抗力小,P3桩后土向前移动比P4桩后土快;坡脚前存在自由场土层,使坡脚范围内的砂土有挤密作用。

#### 4 结论

(1) 桩身最终残余水平位移曲线在砂土层出现拐点,在桩顶位置处位移值最大,且变化趋势均基本相同。随地震波幅值的增大,桩顶水平位移增大。

(2) 斜坡面以上整段桩长的弯矩呈线性变化,但在系梁位置处桩身弯矩出现突变。在土层交界面处出现桩身残余弯矩最大值,且P3桩最大弯矩与P4桩最大弯矩的比值随地震波幅值增大而增加。

(3) 在一定深度范围内,桩-土相对位移随着地震波幅值的增大而增加;在相同地震荷载作用下,由于桩与桩后土产生脱离,桩间砂土提前破坏,P3桩-土相对位移大于P4桩-土相对位移。

#### 参考文献:

- [1] 王青桥,韦晓,王君杰.桥梁桩基震害特点及其破坏机理[J].震灾防御技术,2009,4(2).
- [2] 陶云辉,周勇波,王伟峰.地震条件下双排抗滑桩受力

分析[J].路基工程,2010(2).

- [3] 罗渝,何思明,何尽川.地震作用下抗滑桩作用机制研究[J].长江科学院院报,2010,27(6).
- [4] 于玉贞,邓丽军.抗滑桩加固边坡地震响应离心模型试验[J].岩土工程学报,2007,29(9).
- [5] 叶海林,郑颖人,李安洪,等.地震作用下边坡抗滑桩震动台试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(2).
- [6] 李雨润,孙伟民,梁艳.基于OpenSEES PL液化土中桩基横向动力响应数值模拟研究[J].建筑结构,2015,45(8).
- [7] Wilson D W, Boulanger R W, Kutter B L. Observed seismic lateral resistance of liquefying sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000,126(10).
- [8] Brandenberg S J, Boulanger R W, Kutter B L. Behavior of pile foundations in laterally spreading ground during centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005,131(11).
- [9] Prevost J H. A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1985,4(1).
- [10] Hill R. The mathematical theory of plasticity[M]. London: Oxford University Press, 1950.
- [11] Boulanger R W, Kutter B L, Brandenberg S J, et al. Pile foundations in liquefied and laterally spreading ground during earthquakes: centrifuge experiments and analyses[R]. California: Center for Geotechnical Modeling, University of California at Davis, 2003.

收稿日期:2018-05-22

\*\*\*\*\*

(上接第108页)

应力效应敏感,压应力则相反。美国4个区域中正温度梯度下砼桥面、工字钢的拉应力均相对较大。

(4) 该钢-混叠合梁桥并不是等截面,按照规范计算控制位置的温度加载方式较简单,模拟计算结果可能与实际相差较大。应现场对桥梁截面温度分布情况进行实测,以得到更精确的结构受力情况。

#### 参考文献:

- [1] 张凯龙,马如进,陈艾荣.组合梁桥截面温度分布影响因素对比分析[J].结构工程师,2014,30(5).
- [2] 周良,陆元春,李雪峰.钢-混凝土组合梁的温度效应计算[J].公路交通科技,2012,29(5).
- [3] 阴存欣.钢-混凝土组合梁的温度及收缩效应分析的电算方法[J].中国公路学报,2013,26(2).

- [4] 于幼亮,王高新,周广东,等.基于长期监测数据的润扬大桥扁平箱梁温度分布特性[J].中国公路学报,2014,27(11).
- [5] 陈彦将,王力波,李勇.钢-混凝土组合梁桥温度场及温度效应研究[J].公路交通科技,2014,31(11).
- [6] 卢傲,张春华.中欧规范梯度温度对混凝土桥面板影响对比分析[J].中外公路,2013,33(3).
- [7] 项贻强,龚世康,朱汉华,等.考虑竖向和横向温度梯度的桥梁温度应力分析[J].中国市政工程,2008(1).
- [8] 王达,张永健,刘扬.基于健康监测的钢桁加劲梁钢-混组合桥面系竖向温度梯度效应分析[J].公路交通科技,2015,28(11).
- [9] JTG D62-2004,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:2018-01-03