

文章编号:1000-582X(2003)06-0066-04

钢箱梁桥 SMA 沥青路面温度场的数值模型*

兰中秋¹, 何川¹, 丹宇¹, 陈立¹, 吴光荣²

(1. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044; 2. 交通部重庆公路研究所, 重庆 400035)

摘要:在设计、铺装 SMA 沥青路面时, 必须考虑对路面工作寿命有重要影响的温度因素。在物理简化的基础上, 建立了钢箱梁桥 SMA 沥青路面温度场分析的数值模型。数值计算的结果与福建厦门海沧大桥及重庆鹅公岩大桥的实际测量数据具有较好的一致性。应用该模型, 得到了钢箱梁桥 SMA 沥青路面温度与路基公路表面的温度及当地气温之间的关系。

关键词:钢箱梁桥; SMA 沥青路面; 温度场; 数值模拟

中图分类号:TK123

文献标识码:A

随着我国公路建设的高速发展和路桥建造技术的不断提高, 公路桥采用钢箱梁架设配合改性沥青(SMA 沥青)路面的建设方案受到建设者和研究人员的广泛关注。SMA 沥青路面于 60 年代发源于德国, 现已发展成为欧洲主要交通道路、机场和港区道路流行的沥青混合料, 并在全世界范围内推广^[1]。其具有优异的抵抗永久变形的能力、高度的耐久性, 优良的抗滑性能和较低的交通噪声。但其对材料和工艺要求较高, 初期建设费用比传统的沥青混凝土(AC)也高。因其使用寿命较长, 铺筑厚度较薄和易于养护, 使其路面全寿命成本较低, 而且具有可持续的环境效益。我国已开始将 SMA 路面技术应用在各种重要的如大跨钢箱梁桥面的铺装。各国从 SMA 研究得到的经验发现, 要从这种优良的材料获得最佳性能, 混合料必须精心设计^[2]。

钢箱梁与普通钢架梁相比, 具有刚性好、强度高、现场施工时间短、安装方便等显著特点。但因钢箱梁普遍采用内箱封闭空间的建造方法, 其传热性能较差。因此, 对 SMA 沥青的结构提出了温度响应问题。由于 SMA 沥青混合料在钢箱梁上铺装厚度较薄, 而所依赖的硬路基为刚性的钢板, 混合料直接铺装钢板上, 且整个钢箱梁桥体由钢缆将其悬挂在几座桥墩上, 由太阳辐射和与环境的对流换热得到的热量聚集在箱体内散发不出去, 引起整个钢箱梁桥体的温度很高。这样, 路面高温对沥青混合料的抗变形设计提出了新的要求, 因此, 精确估计沥青混合料的设计温度, 对于指导

沥青混合料的设计, 具有重大意义^[3]。

目前, 国内外对钢箱梁沥青路面温度场的研究尚未见文献报道。重庆公路研究所和福建路桥公司在厦门海沧大桥上安装了一套温度监测系统, 监测路面温度在不同气候条件下的变化情况, 为在国内开展钢箱梁沥青路面温度场的研究打下了良好的基础。为了加快我国钢箱梁沥青路面温度场的研究步伐, 使福建海沧大桥的测量数据能对不同纬度地区有指导作用, 有必要建立不同纬度地区的钢箱梁沥青路面温度场数值模型。

1 简化及数学模型

钢箱梁 SMA 沥青路面的典型横断面如图 1 所示^[4]。钢箱梁采取箱体结构, 钢箱梁上沥青路面由防水粘接层、防护层及面层等 3 层铺装构成。箱体内若干骨梁及隔板将箱体分隔成许多小间, 小间内空。钢箱梁底部为涂有防护漆的钢板。

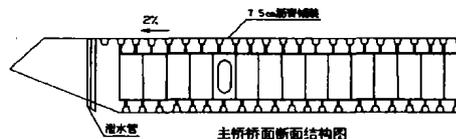


图 1 钢箱梁桥桥体断面图

太阳的辐射热由桥顶路面进入, 路面、桥体侧面及箱底钢板向周围大气环境作对流换热。由于太阳的辐射热随着太阳与地面的相对位置按时角改变而变化,

* 收稿日期:2003-02-28

作者简介:兰中秋(1972-),男,贵州遵义人,重庆大学硕士研究生,主要从事流体机械方面研究。

周围大气温度也随时间变化, 沥青路面的温度场以及箱体内部的温度均随时间改变, 是典型的非稳态传热现象。

为了对 SMA 沥青路面的温度分布模拟计算, 对钢箱梁桥体的传热作如下简化假定:

- 1) 对桥体的传热只考虑太阳辐射和与周围环境的对流换热;
- 2) 忽略钢箱内骨梁及隔板的导热;
- 3) 不考虑车流量在车辙处形成的瞬时温度波峰;
- 4) 不考虑对大气及天空的辐射散热;
- 5) 计算辐射吸热时只考虑无云、天气晴朗的条件下;
- 6) 由于桥梁的长度远远大于桥梁的宽度, 故沿桥梁长度方向的热量变化可以忽略不计。对于组成钢箱梁桥体的每一跨桥体, 沿厢体长度的变化与整个桥梁长度的变化一致, 其变化主要沿厢体的深度变化, 因此可以考虑为一维传热。

因桥面宽度对于日地距离是一个小量, 桥面可简化为一个受辐射点; 考虑到桥面受辐射热的面积与桥体侧面及箱底钢板的对流换热面积大致相当, 而箱体内部的空气相当于一个优良的隔热层, 可以将钢箱梁沥青路面温度场的物理问题简化为图 2 所示的一维非稳态传热模型。

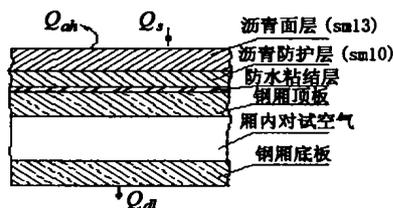


图 2 钢箱梁 SMA 沥青路面的简化物理模型

该物理模型对应的数学描述为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

$$x = 0: \quad q = \alpha Q_s(t) - Q_{air}(t)$$

$$x = L: \quad q = Q_{air}(t)$$

其中, α ——路面对太阳辐射的吸收率; $Q_s(t)$ ——太阳向桥面的总辐射热流; $Q_{air}(t)$ ——桥体向周围大气的对流换热热流; ρ ——材料密度, 各层材料取不同密度值; λ ——材料导热系数, 各层材料取不同值; c_p ——材料比热, 各层材料取不同值;

2 各参数的确定

材料的物性参数包括 ρ, c_p, λ 等, 由现场实验得到, 大气环境温度以考察地点当地气象台站的测量数

据为准。太阳辐射能按参考文献[5]的方法, 根据不同地区的纬度、大气透明度、大气质量, 分别进行计算。路面与大气环境、桥侧及桥底钢板与大气环境间存在对流换热, 钢箱梁箱体内钢板则与箱内空气作自然对流换热。物体表面与大气环境间日间与夜间对流状态存在一定的差异, 箱体内部的对流条件与路面的对流条件也不同。各计算参数的取值见表 1。

表 1 各计算参数取值

| | |
|--|--------|
| SMA13 导热系数 λ_1 (W/m·°C) | 2.05 |
| SMA10 导热系数 λ_2 (W/m·°C) | 2.46 |
| 钢板导热系数 λ_3 (W/m·°C) | 58.2 |
| 空气导热系数 λ_4 (W/m·°C) | 0.0253 |
| SMA13 密度 ρ_1 (kg/m ³) | 2 100 |
| SMA10 密度 ρ_2 (kg/m ³) | 2 100 |
| 钢板密度 ρ_3 (kg/m ³) | 7 850 |
| 空气密度 ρ_4 (kg/m ³) | 1.225 |
| SMA13 比热容 c_{p1} (kJ/kg·°C) | 1 168 |
| SMA10 比热容 c_{p2} (kJ/kg·°C) | 920 |
| 钢板比热容 c_{p3} (kJ/kg·°C) | 460 |
| 空气比热容 c_{p4} (kJ/kg·°C) | 1.005 |
| 路面吸收系数 α | 0.9 |
| 日间对流换热系数 α_1 (W/m ² ·°C) | 10 |
| 夜间对流换热系数 α_2 (W/m ² ·°C) | 14 |
| 箱内空气对流换热系数 α_3 (W/m ² ·°C) | 5 |
| 太阳常数 ISG (W/m ²) | 1 370 |
| 大气透明度 p | 0.6 |
| 厦门地区纬度 WD_{xm} | 24.3 |
| 重庆地区纬度 WD_{cq} | 29.5 |

3 数值模拟计算

对所示的数学模型, 采用有限差分的逆序循环迭代配合 TDMA 算法进行数值计算, 计算精度取 0.001, 根据厦门及重庆气象台站查阅到的气象资料, 分别模拟计算出厦门海沧大桥 2000 年最高温度日 (7 月 28 日) 最低温度日 (1 月 28 日), 重庆鹅公岩大桥 2000 年最高温度日 (7 月 27 日) 最低温度日 (1 月 31 日) 的桥面温度随时间的变化规律。其模拟曲线见图 4 ~ 图 5。其中的计算结果中的各个温度点的位置如图 3 所示。

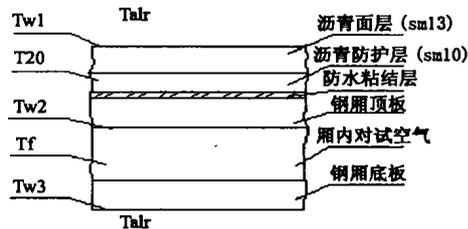
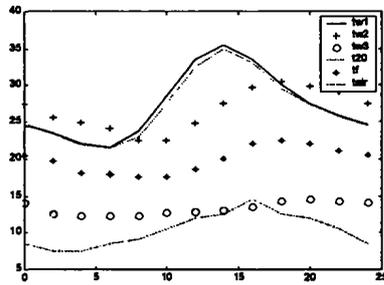
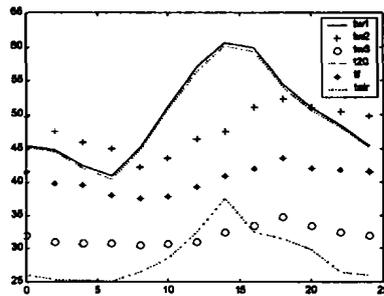


图 3 计算结果中的各个温度点

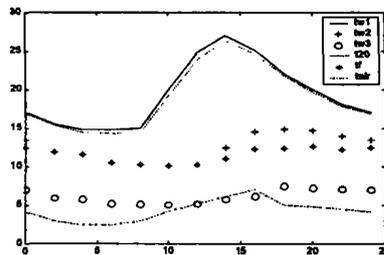


(a)1月28日

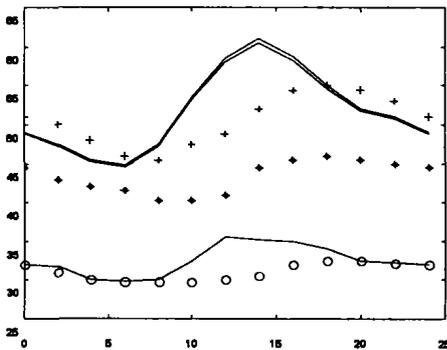


(b)7月28日

图4 厦门海沧大桥



(a)1月31日



(b)7月27日

图5 重庆鹅公岩大桥

4 数值模拟计算结果分析

由附录中的模拟数据表及曲线可以看出以下几个趋势:

- 1) 太阳辐射热在正午 12 点最大;

- 2) 当地大气环境温度延后至 13 点 30 分左右达到最大值;

- 3) 路面温度则延后至 14 点左右方才达到其最大值;

- 4) 钢箱内气体温度在 15 点左右达到最大值。

这些与沥青路面材料的热容较大有关。

1995 年美国沥青协会(AI)编制的《Superpave 水准 I 混合料设计》提出了关于公路沥青路面温度最高值与当地气温之间的关系:

$$T_{20\text{mm}} = 0.9545 \times (T_{\text{air}} - 0.00618L_{\text{lat}}^2 + 0.2289L_{\text{lat}} + 42.2) - 17.78$$

其中, $T_{20\text{mm}}$ ——路面下 20 mm 深处的日最高温度, °C; T_{air} ——年 7 日平均最高气温, °C; L_{lat} ——所在地的地理纬度, 度。

该公式的使用条件为: 对太阳吸收率取 0.90, 风速 4.5 m/s。

1993 年方福森对上海地区沥青混凝土路沥青面层的最高温度给出过经验回归关系式:

$$T_{\text{max}} = 8.68 + 0.874T_{\text{air max}} + 0.007L$$

其中, L ——日辐射热, $\text{J}/\text{cm}^2\text{d}$

对于钢箱梁上的 SMA 沥青路面, 由于目前气象资料收集不够全面, 尚不能根据现有的数值模拟结果给出类似的简单计算关系式。对照以上对路面设计温度的计算式, 可以发现, 钢箱梁桥面上的 SMA 沥青混合料层的表面温度, 比路基公路上的温度高 10 ~ 15 °C, 与当地最高环境温度的关系可以简要地表示为:

$$T_{\text{max}} \leq T_{\text{air max}} + (23 \sim 25) \text{ } ^\circ\text{C}$$

该温度范围受如下几个因素的影响:

- 1) 当地地理纬度 —— 对应与太阳辐射的强弱;
- 2) 当地的大气状况及云量 —— 对应于大气透明度;
- 3) 当地风速 —— 对应路面及桥梁与环境间的对流换热状况;

5 结 论

- 1) 所建立的一维路面非稳态传热模型形式简单, 求解方便, 计算结果表明, 该模型能满足不同纬度地区钢箱梁 SMA 沥青混合料路面温度场的数值研究需要;

- 2) 在高温条件下, 钢箱梁桥面上的 SMA 沥青混合料层的表面温度, 比路基公路表面的温度高 10 ~ 15 °C;

- 3) 在正常气候条件下, 钢箱梁桥面上的 SMA 沥青混合料层的表面温度最高值约比当地的最高气温高出 25 °C 左右。

参考文献:

- [1] 余叔藩. SMA 路面在欧洲的实践[J]. 国外公路, 2002, 120(1): 14 - 18.
- [2] 美国沥青协会. Superpave 水准 1 沥青混合料设计[M]. 余叔藩译. 重庆: 交通部重庆公路研究所, 1997.
- [3] 赵可, 李海骢. 改性沥青感温性评价指标的讨论[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 10.
- [4] 乐云祥, 常英. 大跨钢箱梁斜拉桥施工控制要点分析[J]. 国外桥梁, 2000, (3): 72 - 74.
- [5] 方荣生. 太阳能应用技术[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1985.
- [6] 方福森. 路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.

Numerical Model of Temperature Field in SMA Asphalt Road Surface of Steel Box Girder Bridge

LAN Zhong-qiu¹, HE Chuan¹, DAN Yu¹, CHEN Li¹, WU Guangrong²

(1. Power Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Highway Research Institution of Traffic Ministry, Chongqing 400035, China)

Abstract: When paving SMA asphalt road surface, the temperature factor must be thought over which infects life - span of road surface. Winter and summer temperature distribution on a steel box girder bridge is simulated, compared with data measured on EGongYan Bridge in Chongqing and HaiCang Bridge in Xiamen. A change range of high road surface design temperature suit to China is given.

Key words: steel box girder bridge; SMA asphalt road; temperature distribution; numerical simulation

(编辑 陈移峰)

(上接第 65 页)

Research on X - Ray Computer Tomography for Measuring Residual Stresses of Beryllium Weldment

CHEN Yu-an, ZHOU Shang-qi

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Beryllium is a light rare metal, which is broadly used in nuclear energy, aviation and aerospace industry. As a structural material, the residual stresses in it during processing have a harmful influence upon its products in use. So it is very important to measure the residual stresses. Overcome the shortcoming of traditional X-ray residual stress measuring techniques, X-ray computer tomography is presented. This technique used in the present analyzer can non - destructively measure light metals' residual stresses with depth resolution, such as beryllium, by altering measuring and evaluating method. The residual stresses at the surface nearby welding of arc Beryllium weldment, the depth of 0.5 mm and 1.0 mm under the surface are evaluating by X-ray computer tomography, meanwhile the stress free lattice spacing, d_0 , of beryllium (103) plane is calculated with this technique. The result shows that d_0 is closed to the one calculated by the lattice spacing formula of crystallography.

Key words: X - ray stress analysis; residual stresses; X - ray diffraction; X - ray computer tomography

(编辑 陈移峰)