

大跨径钢结构箱梁桥铺管法热力融雪研究

李自林¹, 詹阳¹, 谢新²

(1. 天津城市建设学院 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;

2. 天津市海河建设发展投资有限公司, 天津 300380)

摘要:本文在道路融雪除冰基础上,分析研究了融雪除冰技术的热融化法在钢箱梁桥上的应用。并根据现代钢箱梁桥及其铺装较薄的特点,对热力管道的铺设提出新的方法,改变传统道路融雪设计上埋管于道路和桥梁铺装层中的方式,换成钢箱顶板下部的铺设位置,并对两种铺设方式的温度场进行对比分析。基于低温钢材脆性理论和钢箱梁桥疲劳特性分析可知钢板处铺设方式保证了钢箱薄弱处冬季工作温度,防止该处发生脆性破坏,既保证了融雪除冰的要求,又保证了钢箱梁桥的安全工作状态。

关键词:融雪除冰;钢箱梁桥;低温钢材特性

中图分类号: U418

文献标识码: A

Research of hydronic snow - melting on pipe laying of long - span steel box girder bridge

LI Zi - lin¹, ZHAN Yang¹, XIE Xin²

(1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Institute of Urban Construction of Tianjin 300384, China; 2. Haihe Construction Development and Investment Co., Ltd., Tianjin 300380, China)

Abstract: Based on the melting ice road, the hydronic melting technology of ice melting method in the application of steel box girder bridge was analyzed. And according to the characteristics of the modern steel box girder bridge with thin shop, the new method of heat pipe laying is put forward. Traditional road de - icing design on buried pipe laying between road and bridge pavement layer were replaced by laying at the bottom of the roof, and the two kind of way of laying temperature field of two scheme were analyzed. And based on the theory of steel brittleness at low temperature and fatigue characteristics of steel box girder bridge analysis, it was concluded that laid means at steel plate could keep operating temperature of steel box in winter and prevent it from brittle failure. The improved scheme could not only meet with demand of melting ice, not only ensure the safety working state of the steel box girder bridge.

Key words: melting ice; steel box girder bridge; Low temperature steel features

国内外交通部门对路面积雪结冰地区作了大量研究,探索出多种抑制路面积雪结冰的方法^[1]。这些方法同样也适用于桥梁方面。对于钢箱梁桥,针对这类桥梁的特点,人工除雪效率较低;机械除雪会损伤桥面甚至阻碍交通;化学方法会腐蚀桥梁钢材以及环境的污染;自应力路面抑制技术还处于研究状态;导电铺面融冰技术耗能严重,

相关的绝缘材料也处于研发阶段,应用比较危险;热力融冰雪技术效果虽好,但往往会产生大量融化雪水,这些水进入路面结构时,会对高速公路带来各种水危害,耗能也是一个问题。综合上述因素的考虑,能量转化型融冰雪技术是最适合在钢箱梁桥上应用的技术^[2],也是现在主流研究方向,此技术在桥梁尤其是钢桥上的应用具有重大

收稿日期:2013-3-27

基金项目:天津市自然科学基金项目(BJCYBJC19600);住房和城乡建设部项目(2012-K4-28)

作者简介:李自林(1953-),河北成安人,教授,从事桥梁工程方面的研究。

意义。

1 钢箱梁结构疲劳特性及钢材低温特性

正交异性钢桥面板细节构造在存在过多焊接时,不可避免会产生焊接残余应力^[3]。由于拉伸残余应力会降低结构的疲劳寿命,使结构在设计使用期内产生疲劳裂纹,影响结构的安全使用。为了降低这种影响,工程中采用诸多措施如喷丸、喷砂、局部加热、局部压缩或过载、超声波锤击等,通过在构件表面引入有利的残余应力体系来延长构件的疲劳寿命。但是桥面板处纵肋、隔板和顶板的连接处,是钢箱梁桥细部最复杂的位置,更容易出现应力集中,减少构件的疲劳寿命。而钢材的屈服强度和极限强度随温度的降低而升高,而且前者升高速度快于后者。说明钢的塑性随温度的降低而降低。同时,钢材的破坏截面伸长率、收缩率随温度的降低而降低,这也说明了钢的塑性和韧性随温度的降低而降低。

根据以往钢结构脆性断裂的破坏的一些实例看出,钢结构的脆性断裂常常是发生在气温较低情况下,称低温冷脆现象。这里的低温通常是指低于 -15°C 的温度^[4]。因此,保证纵肋连接部位的温度,也是提高构件疲劳寿命,防止低温状态脆性破坏的一个有效手段。这就要求在设计热力管道中,考虑这一情况,在满足热力融雪前提下达到纵肋连接处恒温控制的要求。

2 热力管道铺设分析

传统铺管方式中,埋深、管距会对表面热流密度的均匀性有很大影响。当管距较大且埋置深度较小时,不均匀性更加明显,故把上表面作为一个等热流边界是不准确的。此外,当埋置深度相同时,表面最大和最小热流的差值随着管距的增大而增大。同样,表面平均热流也存在相似的变化趋势。

随着管间距、埋深不同,其上下壁面热流密度增加程度不同,在不同的管间距时,有相对应的最佳埋置深度。相同管距时,下表面的能量损失百分比随着埋置深度的增加而增加。相同深度时,下表面的能量损失百分比随着间距的增加而增加。热管层位需考虑强度和热效应两个方面的因素。热管距路面层顶面越近,传热越好,融雪效果也越好。但热管距路面层顶面越近,越容易受到行车荷载的影响,可能造成热管和混凝土的破坏。

在长安大学道路融雪研究中,选取外直径为12 mm,内径为10 mm,壁厚为1 mm的304号不锈钢钢管。依据室内板面升温模拟试验、现场试验路(小板)实测数据,以2小时内板面温差作为衡量指标,计算并提出路表不出现“条带间隔”积雪的最大管网间距及管网最佳方案;推荐埋深以6~12 cm为宜,间距以 ≤ 25 cm为宜^[5]。因此在桥面铺装超过12 cm时,道路方案可以应用到桥面的铺装层中,当桥面铺装较薄时,这种埋管方案就行不通,必须进行调整。

根据公路桥涵设计通用规范(JTG D60-2004)对桥面铺装的要求:对于高速公路和一级公路上桥梁,沥青混凝土桥面铺装层厚度不宜小于70 mm;二级及二级以下公路桥梁,沥青混凝土桥面铺装层厚度不宜小于50 mm。而现代混凝土桥铺装在新材料及黏合剂作用下,如环氧树脂混凝土,铺装厚度也逐渐变薄。虽然铺装层厚度降低有利于热力管道热力传导,但是管道铺设的同时会影响混凝土性能的发,甚至于开裂、粘结层的脱落等情况的发生^[6]。

因此,我们在研究融雪除冰的同时要考虑现代钢桥较薄铺装层的情况,在此基础上调整道路融雪除冰方案。考虑钢箱梁桥的结构特点以及钢材特性,本文提出将热力管道铺设于钢桥面板下方,改变传统混凝土层中埋管的方式,这就避免了车载压力对管道和混凝土铺装的破坏,也使得混凝土中的热管工作温度在 $15\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、路面工作温度在 $-15\sim -3^{\circ}\text{C}$ 时,其“内胀外缩”的变化加大对混凝土路面的破坏程度。保证了桥面铺装的协同性,延长了混凝土尤其是薄层混凝土的使用寿命。

同时热力管道在箱内板下的铺设会有一个很大的问题就是,下部热量散失的问题。对于此问题,本文提出在下部铺设保温泡沫塑料类材料来保证温度的定向传递以及温度散失的阻隔。

这里选用硬质、闭孔的XPS板作为加热部位的隔热层,由于此材料轻巧方便,使用得十分普遍,此种材料容重轻($15\sim 50\text{ kg/m}^3$),容易切割,吸水率低,抗压强度较高,工作温度范围大($-80\sim 75^{\circ}\text{C}$),加入阻燃剂后有自熄性,化学性能稳定,能抵抗酸、碱、盐的侵蚀,而且XPS板易加工成型,主要拥有以闭孔为主的孔隙,导热系数低($0.02\sim 0.06\text{ W/m}\cdot\text{K}$),是现今保温效果最好的材料^[7]。

埋在混凝土中的加热管本文同样选取外直径为12 mm,内径为10 mm,壁厚为1 mm的304

号不锈钢钢管。考虑到钢桥钢箱内的结构特点,采取纵桥向铺设,铺设方式可以直接胶结固定,也可以在钢箱定制过程预设凹槽,前者方便经济,后者导热性能更好。

3 模型建立及分析

模型建立中只需要看两根热管的温度场分布即可,热管的温度是均匀的,所以只需要研究横截面的温度场分布规律就能知道整体的规律,考虑到热管间距的要求,模型横向尺寸为40 cm。

此次研究需要对比钢板下部铺设和沥青混凝土内铺设的温度场,考虑现代钢桥铺装较薄的特点,选取铺装厚度为5 cm。由于此类混凝土铺装材料多为环氧树脂材料,国内在此类材料的导热系数测定上缺少定值,本文中用沥青混凝土材料做代替模拟。国际上采用 superpave 级配设计的沥青混凝土,对于密度为 $2\ 295 \sim 2\ 450\ \text{kg/m}^3$ 、孔隙率 $3\% \sim 7\%$ 时,导热系数为 $1.4 \sim 1.8\ \text{W/m}\cdot\text{K}$,此数据离散性最小,这里可选用 $1.6\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ 作为沥青混凝土的导热系数^[8-9]。

根据外界条件的不同,自然空气对流的换热系数为 $5 \sim 10\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}$,考虑冬季大风造成的热量散失严重,换热系数取最大值 $10\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}$,模型底部设置埋管凹槽,铺设后的覆盖材料选取 XPS 板,XPS 板的导热系数取 $0.04\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ 。模型除底面外,三面处于空气对流状态,外界空气接触温度设定为 -15°C 。由于钢箱内外存在温度差,地板温度提高到 -10°C 。钢材选用 Q345 型碳素钢,导热系数为 $48\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ 。

根据上述参数建立两个基础模型:

模型1:长宽为 $40\ \text{cm} \times 7.6\ \text{cm}$ 的截面模型,上层5 cm 材料为沥青混凝土,下层2.6 cm 材料为 Q345 碳素钢,热管间距20 cm,距边界10 cm,热管温度 15°C ,外界和地板温度分别为 -15°C 和 -10°C ,温度场分布如图1。

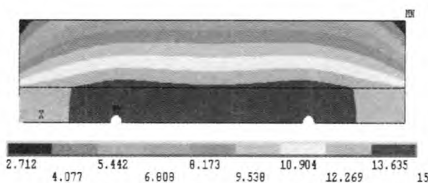


图1 钢板下铺管试件截面温度场分布等值线图
(热管15, 间距20cm)

Fig.1 Temperature field distribution contour map of pipe laying specimen cross section

模型2:长宽为 $40 \times 5\ \text{cm}$ 的截面模型,材料为沥青混凝土,热管间距20 cm,距边界10 cm,热管温度 15°C ,外界和地板温度分别为 -15°C 和 -10°C ,温度场分布如图2。

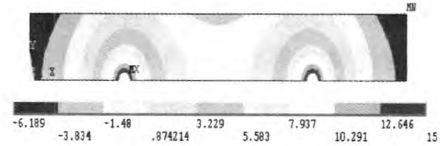


图2 沥青混凝土埋管试件截面温度场分布等值线图
(热管15℃, 间距20cm)

Fig.2 Temperature field distribution contour map of tube specimen cross section under bituminous concrete (hate pipe with 15°C , distance is 20 cm)

从图1和图2两个模型的温度场分布可以看出,在热管温度和外界温度相同的情况下,两种情况有很大差别,新型钢板下铺设的模式温度场分布很均匀,表层温度达到了融雪要求的 $3 \sim 5^\circ\text{C}$ 路面温度要求,钢板上的温度分布也很均匀。而直接埋管沥青混凝土层中的传统模式,虽然材料层更薄,更利于热量的传导,但铺装面温度最低处达到了 -6°C ,温度场分布很不均匀,铺装面表层易于出现“条带间隔”的融雪现象,融雪效果远远没有新型模式好。而且由于直接在混凝土内部铺设的热管,“内胀外缩”的作用下加上热管埋深较浅,会造成沥青混凝土的开裂损坏,降低材料的使用寿命。

考虑到热管的温度原因造成温度场的不均匀分布,提高模型二中热管温度到 30°C ,其它条件不变,软件模拟后如图3。

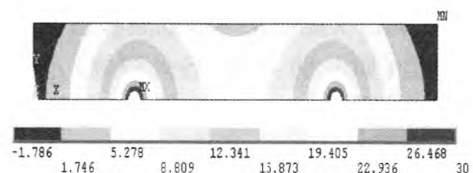


图3 沥青混凝土埋管试件截面温度场分布等值线图
(热管30℃, 间距20cm)

Fig.3 Temperature field distribution contour map of tube specimen cross section under bituminous concrete (hate pipe with 30°C , distance is 20 cm)

从图3可以看出,当提高热管温度后,路面的温度基本达到融雪除冰的温度要求,但是在距离较远的边缘还存在融雪死角,材料层内部的温度场较之模型1仍然不够均匀,造成热应力集中,解

决的措施只能是在两侧材料层外设置保温层、减小热管间距和提高热管温度。这么做都势必增加设计成本,提高热管的温度还会造成材料老化速度加快,钢箱梁在较高温度作用下的动力特性也会变化,给钢桥的安全造成威胁。

新型铺设方式由于将热管置放在钢板下侧,由于钢板的优良导热性,相当于一个热量放大器的原理,将单一的热管温度辐射模式变成了钢板整体的发热模式,温度的重分布使得热量能更均匀的向上传导,降低了热量的损失,降低了设计成本和能源消耗。

为了进一步测试新型铺管模式的优良特性,在保留其它数据的同时,在模型1中,将热管间距扩大到30 cm后,软件模拟结果如图4。

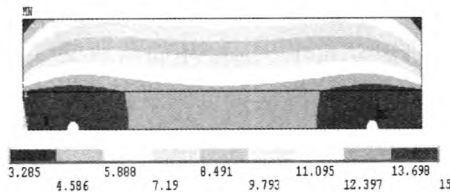


图4 钢板下铺管试件截面温度场分布等值线图
(热管15℃, 间距30cm)

Fig. 4 Temperature field distribution contour map of pipe laying specimen cross section under stale plate(hate pipe with 15 °C, distance is 30 cm)

从图4中看出,在扩大热管间距后,材料内部温度场有所变动,但变动较小,温差不大,路面表面的温度仍然满足融雪要求,只是在钢板处的温差超过3℃,容易使钢板产生温度应力。但是整体性能仍然优越于传统模式。新型铺设方式热量散失较低,所需热管温度较低,这样在工作过程中既不会造成钢板温度应力过大,也不会影响桥梁的动力特性,同时又能防止冬季低温状态下,尤其是钢箱薄弱处(如U肋,T肋,各处焊缝),发生钢结构脆性断裂的破坏。而在考虑这一问题时,要根据需要对热管间距进行调整,保证钢板整体温差不会过大而造成新的应力集中现象出现。

4 结论

1) 钢箱梁桥铺装厚度较小,不能满足传统埋管方式所需要的埋深要求,板下铺管方式解决了这一变化带来的问题,铺管不用考虑在混凝土内部抗压以及与混凝土协同变形的问题。

2) 新型铺管方式中,由于钢材优良的导热性,钢板充当了放大器的作用,将热管的单管放热模式转变成钢板面的放热,热量传递更加均匀稳定,热量散失更少。相比传统模式的埋管方式更加节能和经济。

3) 板下铺管的方式在对钢箱梁桥应力集中的纵肋部位产生了恒温控制,保证该部位冬季工作状态不会处于低温状态,防止产生低温脆性破坏,延长了钢桥的疲劳寿命。

参考文献:

- [1] 张磊. 道路融雪化冰特性实验研究及其数值模拟[D]. 长春:吉林大学,2009.
- [2] 胡文举,姜益强,姚杨,等. 桥面热力融雪模型研究与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(12):1895-1899.
- [3] 王春生,冯亚成. 正交异性钢桥面板的疲劳研究综述[J]. 钢结构,2009,24(9):10-13.
- [4] 张玉玲,潘际炎. 低温对钢材及其构件性能影响研究综述[J]. 中国铁道科学,2003,24(2):89-96.
- [5] 刘凯. 融雪化冰水泥混凝土路面研究[D]. 西安:长安大学,2010.
- [6] 王琪. 融雪化冰路面温度场及工作状态研究[D]. 西安:长安大学,2011.
- [7] 田浩,李国平,李方元,等. 箱形桥梁内外温差空间效应分析[J]. 桥梁建设,2006(6):21-24.
- [8] 陈明宇. 导热沥青混凝土路面太阳能集热及融雪化冰研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
- [9] OPENG CHAO, CAO YONG. The 2011 international conference on computer graphics and virtual reality[C]. las vegas USA, 2011.

(责任编辑 刘存英)