

文章编号:1671-8879(2014)04-0070-07

# 埋管水热式融雪系统对桥面铺装结构的影响

傅 珍<sup>1</sup>, 陆凯詮<sup>2</sup>, 王选仓<sup>3</sup>

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 上海市政交通设计研究院有限公司, 上海 200030;  
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为研究车辆荷载对埋入水热管桥面铺装层的影响,结合依托工程,采用有限元程序,建立了数值计算模型,研究了不同埋管间距、埋深、超载等因素对桥面铺装层结构的力学影响。研究结果表明:埋管间距与埋深对桥面铺装沥青层的影响较小;影响管网应力的首要因素为管网埋深,在满足热力学要求的前提下,可适当加大管网埋深,增大管网间距;超载条件下,轴载从 100 kN 增加到 200 kN,在埋深较浅和埋管间距较小的情况下,管网可以承受桥面超载引起的等效力应力的影响;综合考虑导热融雪效果、管网受力、施工、经济等多方面因素,推荐管网埋深 2 cm,管网间距 15 cm。从铺装层结构受力角度提出埋管式桥面融雪系统管网布设方案。

**关键词:**桥梁工程;埋管水热式融雪系统;桥面铺装;力学分析

**中图分类号:**U443.33 **文献标志码:**A

## Effects of snowmelt system with hydrothermal buried pipes on bridge paving

FU Zhen<sup>1</sup>, LU Kai-quan<sup>2</sup>, WANG Xuan-cang<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;  
2. Shanghai Municipal Transportation Design Institute Limited Company, Shanghai 200030, China;  
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to know the influence of vehicle load on the deck of snowmelt system with hydrothermal buried pipes, a numerical computation model was established in combination with a practical project by use of finite element method to study the mechanic effects of factors like different pipe spacing, depth and overload on the structure of bridge deck with buried pipes. The result shows that the pipe spacing and depth have little effects on the deck asphalt pavement. The primary factor affecting the stress of the pipelines is buried depth. To meet the requirements of thermodynamics, it's appropriate to increase buried depth and pipe spacing. In overload conditions, as the axle load increases from 100 kN to 200 kN, the pipeline can withstand the equivalent stress caused by overload from the deck when buried depth and pipe spacing are small. Synthetically considering the factors such as snowmelt effect, pipe stress, construction and economy, it's suggested that pipe spacing be 15 cm, and buried depth be 2 cm. The layout scheme of bridge

收稿日期:2013-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51108038,51108039);陕西省科技项目(2013KW24, 2013kjxx-94);

中国博士后科学基金项目(2013M532001);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012ZD016)

作者简介:傅 珍(1976-),女,河南鹤壁人,副教授,工学博士,E-mail:fuzhen524@sina.com。

deck snowmelt system with hydrothermal buried pipes is put forward from the perspective of the force structure of the pavement. 3 tabs, 12 figs, 15 refs.

**Key words:** bridge engineering; snowmelt system with hydrothermal buried pipe; bridge paving; mechanical analysis

## 0 引言

路面冰雪问题已成为困扰各地区交通管理部门的重要问题,人们为此开展了大量研究,探索出许多抑制、控制和消除冰雪的技术和方法,如撒布融雪剂、人工和机械除雪、自应力弹性路面铺装、太阳能融雪、发热电缆法、土壤源热管融冰雪、热力融冰雪、微波除冰雪等。撒布融雪剂可以有效清除道路冰雪,但绝大多数的盐类融雪剂产品都存在腐蚀性,易破坏道路与生态环境。人工除雪效率低下,机械除冰雪方法速度相对较快,但易给交通设施造成潜在破坏<sup>[1]</sup>。姚莉莉针对不同环境温度 and 不同冰层厚度,分析了橡胶颗粒沥青混合料的弹性模量与除冰效果之间的关系<sup>[2]</sup>;刘凯等利用太阳能光伏系统对融雪化冰特殊路面结构与材料进行了研究<sup>[3-4]</sup>;李炎锋等建立了发热电缆路面融雪化冰的试验装置,探讨了北京地区沥青混凝土道路铺装发热电缆的功率及应用<sup>[5]</sup>;王华军等在地源热泵技术研究的基础上,开展了太阳能-地热蓄能道路融雪方面的理论和试验工作<sup>[6-7]</sup>;姚运仕等采用多种融冰雪材料对比试验的方法,评价环保型长效主动自融冰雪路面涂层的融冰雪能力和环保性能<sup>[8]</sup>。以上研究在路面、桥面融雪方面取得了一些进展,但也存在一定的缺点和局限性。水热式融雪化冰技术主要以美国、日本、北欧等国家为代表,在该领域开展了许多的研究和应用示范工作,但目前直接把地热水或温泉水作为流体进行路(桥)面融雪的研究国内外均较少<sup>[9-11]</sup>。

合理采用温泉水等地热自然资源不仅环保,而且具有可持续性,具有良好的社会和经济效益。水热式融雪化冰桥面结构由于在桥面防水混凝土铺装层内部按照一定埋深和间距布设了热力不锈钢管网,可以给桥面提供热源和融冰雪所需的温度。本文的依托工程——河南省三淅(三门峡—淅川)高速公路灵卢段的崤山隧道处具有充足的地热温泉水,根据观测,冬季平均水温为 16 ℃,为该段山区高速桥面采取隧道温泉水融雪提供了良好的水源基础。基于此,本文选择崤山隧道出口处的磨盘大桥作为试验段,铺设埋管水热式融雪化冰系统,从车辆荷载

出发,利用现行规范计算方法和有限元数值模拟,对埋入热管的桥面铺装层进行力学分析,研究不同埋管间距与埋深、不同铺装层结构组合、铺装层厚度、水平力系数对桥面铺装层结构的影响,从铺装层结构受力的角度提出埋管式桥面融雪系统铺装结构组成与管网布设方案,为埋管水热式融雪系统的实施提供理论基础。

## 1 埋管式桥面铺装层模型的建立

### 1.1 桥面铺装层模型基本假定

桥面铺装是一种复杂的受力结构,为了对埋管式融雪系统桥面铺装层结构进行受力影响分析,建立有限元模型时对模型的结构和材料特性作如下假定<sup>[12-13]</sup>。

(1) 弹性假定:假设沥青混凝土铺装层、混凝土桥面各结构层、不锈钢管为均匀、连续、各向同性的弹性体。

(2) 界面连续假定:假定铺装层与桥面板间及铺装层间完全连续,并且埋入铺装层的热力不锈钢管与铺装层间完全连续(应力与应变连续)。

(3) 不计自重:铺装层的施工都是在桥梁主体结构完成之后进行的,分析时不考虑水泥混凝土桥面板及沥青混凝土铺装层重力的影响。

(4) 不考虑桥墩与承台的变形及桥梁下部结构,只研究上部结构。

### 1.2 有限元模型的建立

在桥面铺装结构计算模型中,要充分考虑实际情况、边界条件以及研究对象的影响,同时考虑荷载影响范围和计算精度<sup>[14]</sup>,选择尺寸为 3 m×3 m×0.38 m 的桥面板进行计算,自上而下依次为沥青面层、不锈钢管、桥面板,由于本文的研究对象为管,因此忽略防水粘结层的作用。

#### 1.2.1 荷载作用模型

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)规定路面荷载加载形式为采用双圆均布垂直荷载作用 BZZ-100。对模型进行计算分析时,采用荷载为轴重 100 kN,轮压 0.7 MPa,双轮中心距 32 cm。根据前人研究成果,双轮荷载可以简化为 2 个矩形均布荷

载<sup>[12]</sup>。为方便模型划分和计算,2 个矩形的纵向尺寸为 20 cm,横向尺寸为 18 cm,2 个矩形边缘的间距为 12 cm。荷载图示及相应尺寸如图 1 所示。其中  $x$  方向为横桥面方向, $y$  方向为顺桥面方向, $z$  方向为垂直于桥面方向。边界条件为铺装层底面上没有  $z$  方向位移,左右垂直于  $x$  方向的两面没有  $x$  方向位移,垂直于  $y$  方向的前后两面没有  $y$  方向的位移<sup>[15]</sup>。

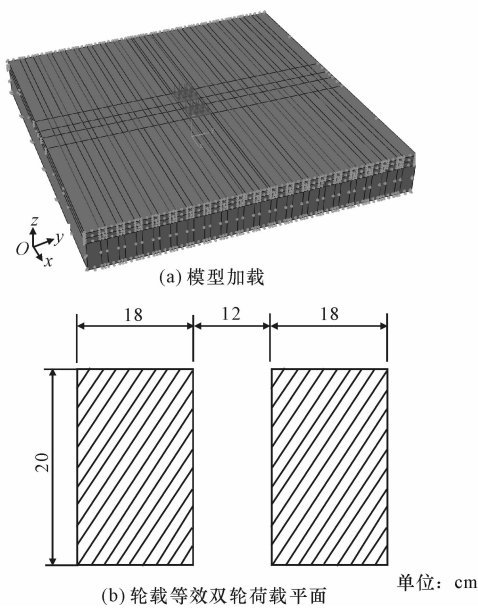


图 1 模型加载与轮载等效双轮荷载平面  
Fig. 1 Model loading and wheel load equivalent plane  
1.2.2 单元与网格划分

沥青混合料铺装层、不锈钢管以及水泥混凝土铺装层均采用 6 面体实体单元 C3D8R。单元网格划分采用等距划分、局部加密的方法,在行车荷载周围和不锈钢管采用较细的网格,如图 2 所示。

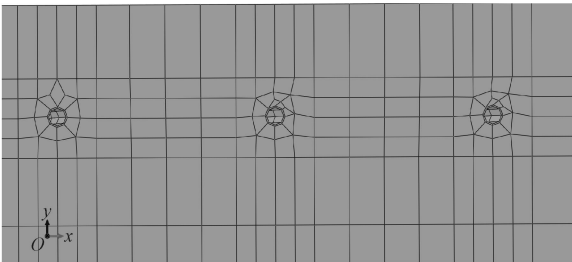


图 2 网格划分后的计算模型与不锈钢管网格划分细部模型  
Fig. 2 Computational model after meshing and detail model of stainless steel meshing  
1.2.3 计算参数的选取

结合课题相关研究成果,根据《混凝土设计规范》(GB 50001—2001)和《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006),本文采用的桥面铺装结构计算参数见表 1。

表 1 桥面铺装结构计算参数  
Tab. 1 Calculation parameters of bridge decks

路面结构层次	材料结构类型	厚度/cm	20 ℃回弹模量/MPa	泊松比
沥青铺装层	沥青混凝土	5	1 200	0.25
不锈钢管	304 不锈钢管	1.4×0.1	206 000	0.30
桥面水泥板	水泥混凝土	33	30 000	0.15

## 2 不同工况作用下埋管式桥面铺装层结构力学响应

桥面铺装作为桥梁结构体系的重要组成部分,受力非常复杂。埋管式融雪化冰系统的桥面铺装层由于加入了热力不锈钢管网,对桥面来讲相当于加入钢筋,增强了桥面的整体力学性能。由于山泉水的特殊性,其水温仅 16 ℃,内外温差较小,因此忽略管网的温度翘曲应力,主要研究加入埋管后车轮荷载对埋管的力学作用。埋入的不锈钢管是通过氩弧焊焊接方法连接而成,焊点处即为整个管网的最薄弱环节。不同的埋管深度和埋管间距等因素会引起桥面力学响应发生变化,因此有必要分析埋管深度、埋管间距、超载等工作条件对埋管式融雪化冰桥面铺装结构与管网力学响应的影响。

铺装层和桥面板的材料性质差异较大,沥青混凝土和防水层的模量远小于桥面板水泥混凝土模量,其工作状态既不同于一般的公路路面,也不同于钢桥上的桥面铺装。而埋管的加入也相当于起到了对铺装层的加筋作用,故进行铺装层的埋管受力分析时,不需要考虑整体模型的最不利荷位,计算模型截取桥面铺装层的一部分进行计算分析。

### 2.1 不同管网方案对桥面铺装层应力的影响

#### 2.1.1 埋管间距对桥面铺装结构应力的影响

取埋管深度不变(埋管深度为水泥混凝土上表面与埋管的上表面距离),埋设间距分别为 10、15、20、25、30 cm 进行计算,分析比较薄沥青层的受力情况。沥青混凝土层层间最大剪应力、层底最大拉应力、最大竖向压应力、沥青层最大 mises 应力(米塞斯应力,第四强度相当应力)、沥青层最大弯沉随埋管间距的变化曲线如下页图 3~图 7 所示。

从图 3~图 7 分析可得,保持埋深固定的前提下,随着埋管间距的增大,沥青层与水泥混凝土层层间最大剪应力、沥青层层底最大拉应力、沥青层最大 mises 应力、沥青层最大弯沉均呈现增大的趋势,分别增加了 58.9%、22.3%、0.7%、24.3%,而其实际的变化幅度和数值相差都不是很大;相应的沥青层

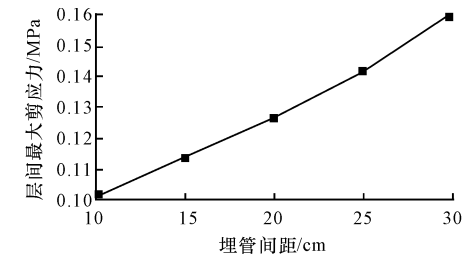


图 3 层间最大剪应力随埋管间距变化曲线  
Fig. 3 Curve of interlayer maximum shear stress with pipe spacing

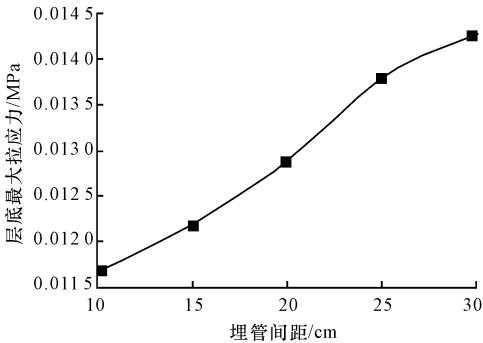


图 4 层底最大拉应力随埋管间距变化曲线  
Fig. 4 Curve of maximum tensile stress on layer bottom with pipe spacing

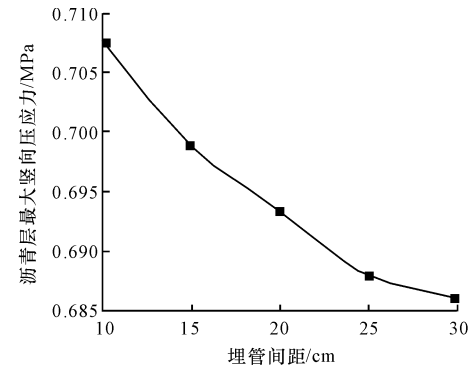


图 5 沥青层最大竖向压应力随埋管间距变化曲线  
Fig. 5 Curve of maximum vertical stress of asphalt layers with pipe spacing

最大竖向压应力呈现减小趋势,减少了 2.0%,相对影响则更小。即埋管间距对桥面铺装沥青层的影响较小。

2.1.2 埋管埋深对桥面铺装结构应力的影响

取埋管间距不变(30 cm),埋管的埋设深度分别取 2、3、4、5、6 cm 进行计算,分析比较薄沥青层的受力情况。沥青层最大竖向拉应力和最大 mises 应力随埋管埋深变化曲线如图 8、图 9 所示。

当埋管间距不变时,随着埋管埋深的增大,沥青层层底最大拉应力、沥青层最大弯沉均变化甚微,几乎不变。从图 8、图 9 可以看出,沥青层最大竖向拉

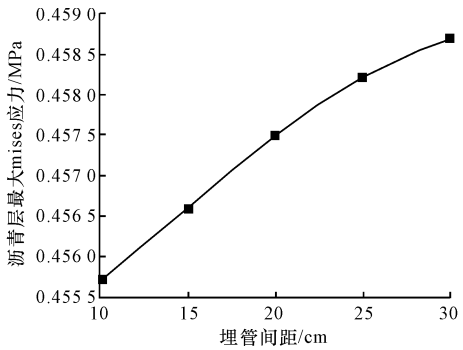


图 6 沥青层最大 mises 应力随埋管间距变化曲线  
Fig. 6 Curve of maximum mises stress of asphalt layers with pipe spacing

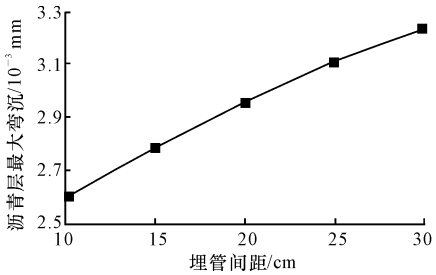


图 7 沥青层最大弯沉随埋管间距变化曲线  
Fig. 7 Curve of maximum deflection of asphalt layers with pipe spacing

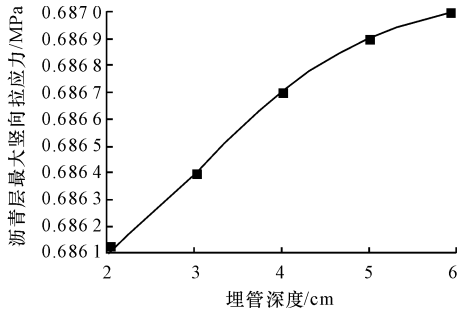


图 8 沥青层最大竖向拉应力随埋管埋深变化曲线  
Fig. 8 Curve of maximum vertical stress of asphalt layers with buried pipe depth

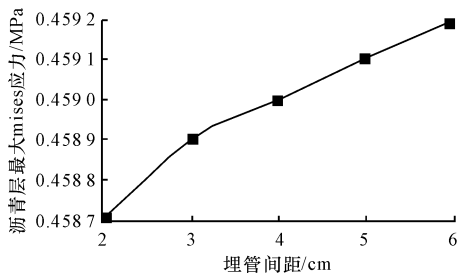


图 9 沥青层最大 mises 应力随埋管埋深变化曲线  
Fig. 9 Curve of maximum mises stress of asphalt layers with buried pipe depth

应力和沥青层最大 mises 应力逐渐增大,分别增加了 0.13%和 0.1%,变化幅度和数值也非常小,因而

埋深对桥面铺装沥青层的影响较小。

结合以上分析,埋管间距和埋管埋深对桥面铺装沥青混凝土层的应力影响较小,以下将针对不同埋管埋深和间距的管网方案对桥面铺装结构内的管网应力进行分析。

2.2 不同管网方案对管网应力的影响

根据已有埋管间距,铺装层结构为 5 cm 沥青混凝土层+13 cm 防水水泥混凝土层,埋管的埋设深度分别取 2、3、4、5、6 cm,埋设间距分别取 10、15、20、25、30 cm 进行计算研究。主要研究铺装层内埋设的不锈钢管网的应力,由于管子为金属管,而计算结果中应力变化最大以及起到关键影响的主要为不锈钢管网中间管子的最大 mises 应力和横桥向最大拉应力,埋深 2 cm、间距 15 cm 管网的应力云图如图 10 和图 11 所示。

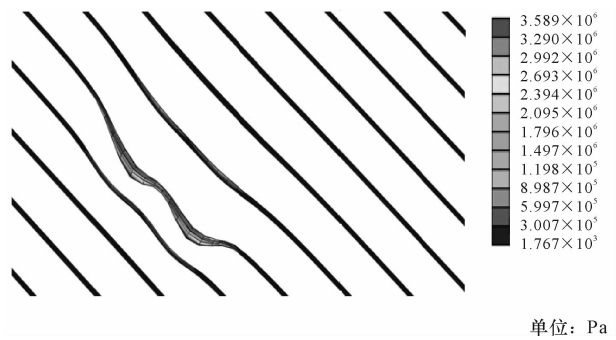


图 10 管网 mises 应力分布

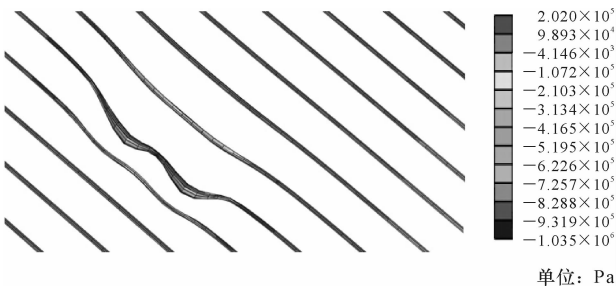


图 11 管网横桥向拉应力分布

由图 10 和图 11 分析可知:

(1)荷载作用下中间管子受到的作用力影响越大,管网越远离荷载和中间管,受到荷载的影响越小,因此在分析不同管网方案对管网的受力作用时可以只分析中间管子的极值应力。但由于桥面板中荷载的存在,在管端部的拉应力都较大,而在管中部一般压应力较大。

(2)管网间距不变,管子埋深越深,中间管子的最大 mises 应力越小,而中间管子横向拉应力越大。

这是因为埋管越深,管子受到的等效应力越小,而其优异的抗弯拉性能得以更好地发挥,混凝土板和钢管网的协同受力更好,则两者的应力值都明显变小,即工作状态更好,更能充当受拉钢筋的作用。因此,从工作状态来讲,管子埋深越大,越具有良好的工作状态。

为了研究不同埋深、埋管间距对管网力学响应的影响大小,对不同工况组合下的各指标进行双因素方差分析,通过  $F$  值评价各工况的影响大小,其中  $F$  值的大小表征所考虑因素水平变化时对响应量波动的贡献, $F$  值越大的因素对试验响应值影响越大。Sig. 的值表征显著性水平,该值小于 0.05 则称为统计学显著,即因素对试验结果影响显著;反之,则因素对试验结果不显著。由前面各种工况对管网力学响应分析,下面只分析各工况对中间管子最大 mises 应力和最大横向拉应力的影响大小。

(1)对最大 mises 应力的影响显著性分析

表 2 为埋深和间距对中间管子最大 mises 应力的方差分析结果。

表 2 最大 mises 应力方差分析

Tab. 2 Analysis of variance results of maximum mises stress					
源	III 型平方和	自由度	均方	$F$	Sig.
校正模型	1.866a	8	0.233	200.382	0.000
截距	245.518	1	245.518	210 894.033	0.000
间距	0.318	4	0.080	68.369	0.000
埋深	1.548	4	0.387	332.395	0.000
误差	0.019	16	0.001		
总计	247.402	25			
校正的总计	1.885	24			

a.  $R^2 = 0.990$ (调整  $R^2 = 0.985$ )

从表 2 可以看出,埋深和间距对应  $F$  值的显著性水平均远小于 0.05,表明此两项因素均显著影响管网 mises 应力。但由  $F$  值的大小排序可以看出,埋深对 mises 应力的影响更大,埋深对应的  $F$  值是间距对应  $F$  值的 4 倍多。

(2)对最大横向拉应力的影响显著性分析

下页表 3 为埋深和间距对中间管子最大横向拉应力的方差分析结果。

从表 3 可以看出,埋深和间距对应  $F$  值的显著性水平均远小于 0.05,表明此两项因素均显著影响管网横向拉应力。但由  $F$  值的大小排序可以看出,埋深对最大横向拉应力的影响更大,埋深对应的  $F$  值是间距对应  $F$  值的 10 倍多。

表 3 最大横向压应力方差分析  
Tab. 3 Analysis of variance results of  
maximum transverse tensile stress

源	III 型平方和	自由度	均方	F	Sig.
校正模型	0.308a	8	0.039	44.172	0.000
截距	2.752	1	2.752	3 152.823	0.000
埋深	0.280	4	0.070	80.253	0.000
间距	0.028	4	0.007	8.090	0.001
误差	0.014	16	0.001		
总计	3.074	25			
校正的总计	0.322	24			

a.  $R^2 = 0.995$ (调整  $R^2 = 0.990$ )

综合分析可知,影响管应力的第一因素为管网埋深,其次才是管网间距,这与文献[2]中的结论一致。无论方案如何变化,管网应力的绝对数值和变化幅度都不大,且在多种方案中,管网所受的最大应力都远小于不锈钢管自身以及焊接点的屈服条件。因此,管网设计时,在满足热力学要求的前提下,可适当加大管网埋深,增大管网间距。

2.3 超载对桥面铺装结构应力的影响

在超载情况下,当轴载从标准轴载 100 kN 增加到 200 kN 时,车辆轮胎对桥面的接地压强随之变化。一般采用比利时算法确定轮胎接地压强,即轮胎接地面积、接地压强与轴重之间关系,如式(1)所示。

$$A=0.008P+152\pm70$$
$$P_i=\frac{P}{A} \tag{1}$$

式中: $A$  为轮胎接地面积( $\text{cm}^2$ ); $P$  为轮载(N); $P_i$  为轮压(MPa); $\pm70$  为保证率为 90%的离差范围。

取埋管间距为 15 cm,埋深为 2 cm,分别计算荷载由标准轴载 100 kN 变化到 200 kN 的情况下,管网的最大 mises 应力,结果如图 12 所示。

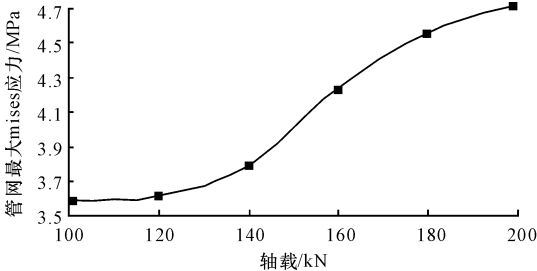


图 12 管网最大 mises 应力随不同轴载的变化曲线  
Fig. 12 Curve of maximum mises stress of  
pipe network with different axle loads

由图 12 可知,轴载从 100 kN 增加到 200 kN,中间管子的最大 mises 应力从 3.589 MPa 增加到

4.741 MPa,增加了 32.1%,增加幅度和数值大小远小于不锈钢管本身以及焊接点的屈服条件,因此可以认为在埋深较浅和埋管间距较小的情况下,管网能够承受桥面超载带来的等效应力影响。

综合考虑融雪效果、管网受力状态以及施工因素,故取推荐管网埋深为 2 cm,间距为 15 cm。

3 基于桥面铺装层结构力学分析的最佳管网布设方案

根据上述分析,由于管网的埋入对于加荷载条件下桥面铺装层和管网的应力影响并不明显,融雪化冰桥面的埋管受力最大的为荷载作用下的位置,而实际上埋深和间距的变化对不锈钢管和铺装层的受力变化幅度都在承受范围内,因此在推荐最佳管网时建议在优先满足融雪导热性要求的前提下,可以适当加深埋深和加大间距。

综上所述,管网最佳推荐方案首先应考虑融雪化冰桥面的导热融雪性能,其次考虑管网的工作状态,最后才是桥面铺装层的工作状态;而影响铺装层和管网应力状态的主要因素是管网埋深,其次才是埋管间距,综合考虑融雪效果,以及管网的受力状态,故推荐管网埋深为 2 cm,间距为 15 cm。

4 结 语

(1)当埋深分别保持一定而埋管间距增大、埋管间距不变而埋管埋深增大时,沥青层与水泥混凝土层层间最大剪应力、沥青层层底最大拉应力、沥青层最大 mises 应力、沥青层最大竖向压应力、沥青层最大弯沉的变化幅度均较小,因此埋管间距与埋深对桥面铺装沥青层的影响较小,设计时可作为次要考虑因素。

(2)影响管网应力的第一因素为管网埋深,其次才是管网间距。无论方案如何变化,管网应力的绝对数值和变化幅度都不大,且在多种方案中,管网所受的最大应力都远小于不锈钢管自身的屈服抗拉强度。因此管网设计时,在满足热力学要求的前提下,可适当加大管网埋深,增大管网间距。

(3)通过超载对铺装层管网的应力影响分析可知,轴载从 100 kN 增加到 200 kN,中间管子最大 mises 应力的增加幅度和数值远小于不锈钢管的屈服条件,因此可以认为在埋深较浅和埋管间距较小的情况下,管网可以承受桥面超载引起的等效应力的影响。

(4)综合考虑导热融雪效果、管网的受力状态、

车辆荷载、施工、经济等多方面的因素,推荐管网埋深为3 cm,间距为15 cm。

(5)下一步建议冬季对试验段进行跟踪观测,以验证融雪效果。

## 参考文献:

## References:

- [1] 王选仓,陆凯途.公路路面融雪化冰技术与发展[J].筑路机械与施工机械化,2013,30(1):26-31.  
WANG Xuan-cang, LU Kai-quan. Technology and development of snow melting and deicing of highway pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(1): 26-31. (in Chinese)
- [2] 姚莉莉.橡胶颗粒弹性除冰路面关键技术研究[D].西安:长安大学,2012.  
YAO Li-li. Research on key technology of granulated crumb rubber anti-ice asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [3] 刘 凯.融雪化冰水泥混凝土路面技术研究[D].西安:长安大学,2010.  
LIU Kai. Study on the technology of snow melting and deicing for cement concrete pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [4] 刘 凯,王 芳,王选仓.水泥混凝土导热性能影响因素及预估模型研究[J].建筑材料学报,2012,15(6):771-777.  
LIU Kai, WANG Fang, WANG Xuan-cang. Influence factor of thermal conductivity of cement concrete and its prediction model[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 771-777. (in Chinese)
- [5] 李炎锋,武海琴,王贯明,等.发热电缆用于路面融雪化冰的实验研究[J].北京工业大学学报,2006,32(3):217-222.  
LI Yan-feng, WU Hai-qin, WANG Guan-ming, et al. Experimental study on the electrical road heating system for snow melting[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2006, 32(3): 217-222. (in Chinese)
- [6] 王华军,赵 军,陈志豪,等.太阳能-地热道路融雪系统路面传热特性的数值研究[J].太阳能学报,2007,28(6):608-611.  
WANG Hua-jun, ZHAO Jun, CHEN Zhi-hao, et al. Numerical study on heat-transfer behavior of the pavement in road snow-melting system with solar and geothermal energy[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007, 28(6): 608-611. (in Chinese)
- [7] Zhao J, Wang H, Chen Z, et al. Seasonal behavior of pavement in geothermal snow-melting system with solar energy storage [J]. Transactions of Tianjin University, 2006, 12(5): 319-324.
- [8] 姚运仕,陈团结,向 豪,等.环保型长效自融冰雪路面涂层试验[J].交通运输工程学报,2013,13(4):8-15.  
YAO Yun-shi, CHEN Tuan-jie, XIANG Hao, et al. Experiment of active deicing and snow melting pavement coating with environmental friendly and long-term action[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4): 8-15. (in Chinese)
- [9] Morita K, Tago M. Operational characteristics of the gaia snow-melting system in Ninohe, Iwate, Japan [R]. Oregon: Oregon Institute of Technology, 2000.
- [10] Lund J W. Reconstruction of a pavement geothermal deicing system [R]. Oregon: Oregon Institute of Technology, 1999.
- [11] Okkonen J, Klove B. A sequential modeling approach to assess ground water-surface water resources in a snow dominated region of Finland[J]. Journal of Hydrology, 2011, 411(1/2): 91-107.
- [12] 高 健.采用不同防水粘结层的水泥混凝土桥桥面铺装受力分析[D].西安:西安建筑科技大学,2011.  
GAO Jian. Mechanical analysis of the deck paving on the cement concrete bridge with different waterproof and cohesive layers [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [13] Wang H N, Huang Z H, Li L, et al. Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 55-61.
- [14] 张海宾,李小建.基于综合工况的桥面铺装层间工作状态研究[J].中外公路,2012,32(6):223-226.  
ZHANG Hai-bin, LI Xiao-jian. Study on interlayer working state of bridge deck based on composite working condition [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(6): 223-226. (in Chinese)
- [15] 于 颖.水泥混凝土桥桥面铺装受力机理分析[D].重庆:重庆交通大学,2008.  
YU Ying. Mechanics analysis of concrete bridge deck pavement. [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)

