

考虑路面防结冰的城市隧道路面下热管敷设方案研究

董盛时¹, 黄俊¹, 葛栋², 张澍珣², 季红玲¹

(1. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 南京城建隧桥智慧管理有限公司, 江苏 南京 210017)

摘 要: 针对利用隧道结构提取浅层地热能用以路面防结冰的系统, 基于隧道敞开段结构特点提出隧道下路面埋管的总体敷设方案。在总体方案的基础上, 通过建立道路下埋管数值模型, 分析了路面埋管总体换热特点, 以及埋管间距对路面埋管换热性能的影响。结果表明: (1) 路面下换热管宜敷设在混凝土铺装层中, 并采用单 U 型平行坡面布设; (2) 在一定范围内, 相邻 U 型管间距是影响路面埋管防结冰系统效果的主要因素, 进出水口间距变化对埋管防结冰系统运行效果影响并不明显。最后分析得到了该研究依托工程最佳性价比的埋管敷设方案, 给类似工程应用提供了思路。

关键词: 城市隧道; 地热防结冰; 路面埋管; 数值模拟

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)11-0236-04

0 引 言

鉴于目前传统的路面融雪除冰技术存在效率低下、融雪滞后、损伤路面、占用交通等缺点^[1,2], 国内外出现了大量的主动融雪化冰技术, 包括: 电加热法、流体加热法, 以及地热管法^[3]。其中, 地热管法进行路面融雪防结冰的方法得到了国内外学者们的关注。Wenke Zhao 等^[4]通过试验研究了热管融雪防结冰系统在中国寒冷地区的应用, 结果表明了其良好的应用效果。G. Allen Bowers Jr 等^[5]探讨了桥面热管融雪防结冰系统的工作原理, 并基于工作原理研究了各因素对系统运行效果的影响。党政等^[6]通过试验研究了能源桩用于道路防结冰的可行性, 结果证明了其良好的应用效果。

随着城市隧道的快速发展, 有研究^[7]开始考虑通过提取隧道结构周围岩土体中的浅层地热能用以隧道路面的融雪防结冰。通过研究发现这种地热防结冰系统拥有较好的应用与节能效果。

现有的研究只是对于该系统利用的可行性与节能效果进行了分析, 而缺乏更加细化的埋管设计方案。对此, 将继续针对隧道敞开段路面热管防结冰系统, 研究路面下热管敷设方案, 以期为类似的工程应用提供参考。

1 考虑隧道敞开段结构特点的路面埋管总体敷设方案

现依托南京某典型城市隧道敞开段路面开展研究, 考虑在隧道敞开段路面下布置换热管, 通过换热管中的热水循环与沥青路面进行热交换来达到冬季融雪防结冰的目的。

如图 1 所示是典型城市隧道敞开段横断面示意图, 从路面往下分别为路面沥青层、混凝土铺装层、隧道主体结构底板, 素混凝土垫层、碎石回填层, 以及隧道桩基础。隧道路面横坡 2%, 路面沥青层在整个断面方向厚度一致且与路面横坡保持一致, 路面沥青层一般由多层不同类型的混合料组成; 混凝土铺装层下底面水平, 上顶面与路面横坡保持一致, 材料为 C30 混凝土, 在上表面内侧敷设有钢筋网; 隧道主体结构底板为钢筋混凝土结构。

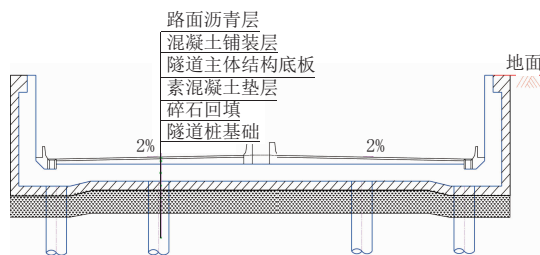


图 1 城市隧道敞开段典型横断面示意图

对于依托工程, 路面沥青层的厚度为 10 cm, 混凝土铺装层的厚度为 18~40 cm, 隧道主体结构底板厚度为 100 cm。基于断面各层位情况, 综合考虑结构受力与换热性能, 换热管宜敷设在混凝土铺装层中,

收稿日期: 2022-02-24

基金项目: 南京市城乡建设委员会科技计划项目(Ks1938)

作者简介: 董盛时(1989—), 男, 博士, 工程师, 从事隧道浅层地热能开发利用的科研与设计工作。

若换热管埋深较浅,车辆的行驶易损坏管路;若换热管埋深较深,热量难以及时传导到路面,防冻效果不佳。同时,考虑方便施工,换热管将捆绑在混凝土铺装层钢丝网下方,换热管走向与路面平行。换热管主管布置在敞开段绿化带中,为了方便后期运维,换热管采取单 U 型布置,并且在每根 U 型管上增加阀门,在单个 U 型管路出现损坏时,通过阀门将损坏的管路关闭。具体铺设方式如图 2 所示。

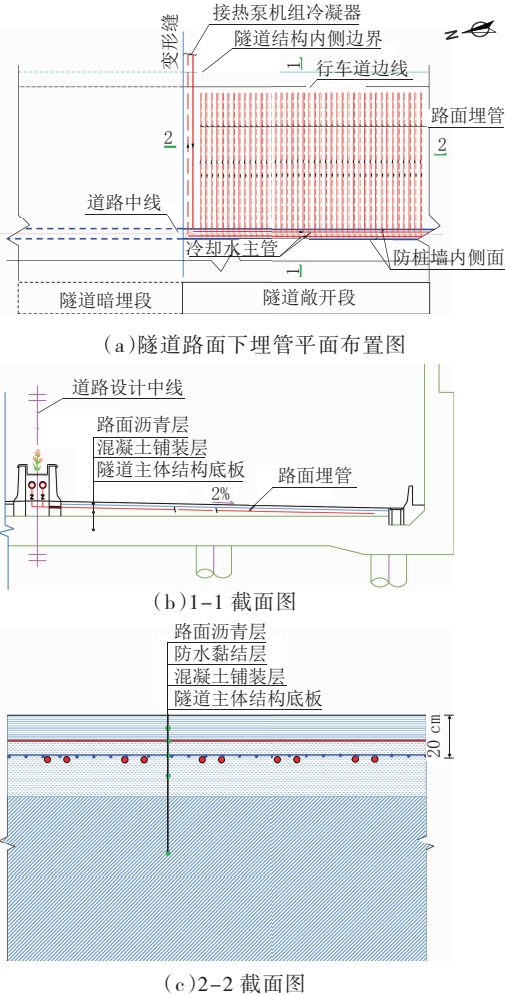


图 2 隧道敞开段路面换热管布置示意图

将路面下换热管的总体敷设方案列入表 1 中,基于隧道敞开段路面结构特点考虑了路面下换热管的布置位置、布置形式、路面下埋深,以及管材管径。对于单 U 型管进出水口,以及相邻 U 型管之间的间距需要通过计算研究后确定。为此,拟通过 FLUENT 进行不同埋管间距下的换热性能模拟,以确定最佳的埋管敷设方案。

表 1 路面下换热管总体敷设方案一览表

布置位置	布置形式	路面下深度	管材管径
混凝土铺装层	单 U 并联	20 cm	DN25 不锈钢管

2 数值模型建立

2.1 模型建立

隧道敞开段路面埋管换热的物理模型如图 3 所示。模型长 11 m(路面行车层宽度),由于路面坡度的存在,模型深 5.98~6.20 m。基于典型城市隧道敞开段横断面(见图 3),模型分为 4 层,从上往下依次为沥青层(厚度为 0.1 m)、混凝土层(厚度为 1.18~1.40 m)、碎石回填层(厚度为 0.5 m)、岩土层(厚度为 4 m)。路面下换热管敷设在混凝土铺装层,U 型管轴线与路面面层平行,与路线走向垂直,U 型管为 DN25 的不锈钢管,U 型管底部距离路面另一侧边界距离为 0.1 m。

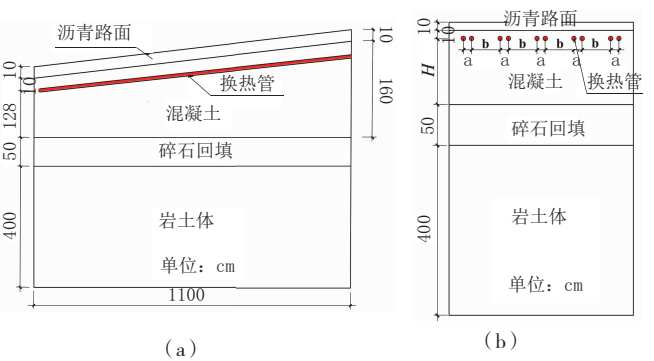


图 3 隧道敞开段路面埋管几何模型

研究考虑了三种不同的间距方案,方案一:单 U 型管进出水口间距 $a=10\text{ cm}$,相邻 U 型管间距 $b=20\text{ cm}$ 。方案二:单 U 型管进出水口间距 $a=10\text{ cm}$,相邻 U 型管间距 $b=35\text{ cm}$ 。方案三:单 U 型管进出水口间距 $a=25\text{ cm}$,相邻 U 型管间距 $b=35\text{ cm}$ 。

在 Fluent 中进行模拟传热的过程中,越靠近管壁处,温度变化越剧烈,随着距离管壁的距离加大,温度变化趋于平缓,所以,在划分网格时,越靠近管壁处,网格越密集;同时,在不锈钢管弯曲处,弯曲的程度越大,则流场变化越剧烈,因此在不锈钢管拐弯处进行了细化加密处理(见图 4)。

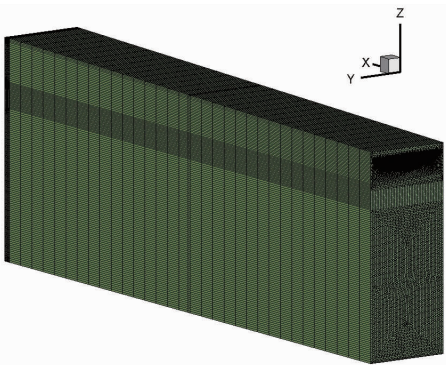


图 4 模型网格划分图示

边界条件的选取,对于计算结果的准确性影响较大。如果与工程实际保存一致,又会导致边界条件设置很复杂。因此,如何根据实际工程来进行边界条件提取、简化设置,又能保证计算精度满足仿真需求就显得十分重要。

在Y方向上,道路总长为245 m,该模型选取其中一小部分,道路其他部分与该部分换热管布置方式相同。因此,在该模型Y方向左右两侧表面使用对称边界条件。在X方向上,道路左右两侧沿道路中轴线对称,所以对于模型X方向代表道路中轴面的部分采用对称边界条件。

路面与外界环境空气接触,其设置为对流换热边界条件,根据《暖通空调系统设计》手册,南京冬季空调室外设计风速为3.8 m/s。根据相关文献[11],在风速3.5~5 m/s的情况下,对流换热系数可设置为 $20\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 。

对于地下埋管与水及其与混凝土的传热为耦合传热过程,因为接触面要设置为耦合传热面,设置时需要根据不同的材料进行材料属性设置,

2.2 计算参数选取

为了使整个仿真计算过程与实际工程更贴近,在仿真计算过程中,将计算区域进行分区处理并进行材料属性设置。根据地勘报告及相关文献[8],模型相关的计算参数如表2所列。

表2 路面埋管相关材料参数表

参数	路面沥青	混凝土结构	碎石回填	土体	钢管
导热系数 /[W·(m·K) ⁻¹]	1.4	2.34	1.2	1.44	16.2
密度 /(Mg·m ⁻³)	2 200	2 500	2 100	1 800	7 800
比热容 /[J·(kg·K) ⁻¹]	900	970	800	1600	460
弹性模量 /MPa	1 200	30 000	10 000	80	200 000
泊松比	0.25	0.2	0.2	0.5	0.25
线膨胀系数 /K ⁻¹	1e-5	1e-5	6e-6	5e-7	1e-5

3 数值模拟结果及分析

3.1 路面埋管换热系统传热总体分析

为了更直观地分析整个区域的温度分布情况,本节选取了道路纵向截面X=8 m及Y=0截面进行温度分布说明。图5所示为环境温度-4℃,入口水温29℃下的X=8 m的温度分布云图,可知埋管内温度最高,而越靠近隧道道路表面,温度越低,原因为道路表面有-4℃的低温进行对流换热,导致地表温

度较低。

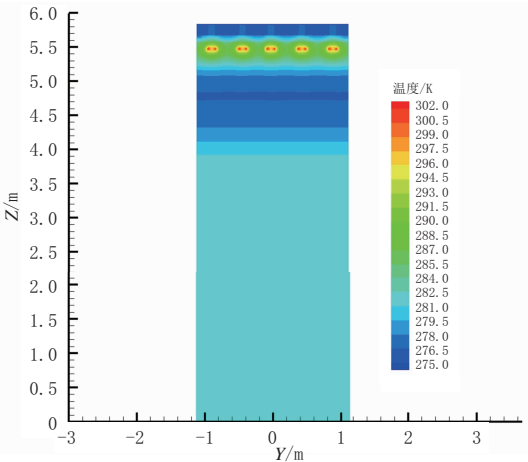


图5 X=8 m截面温度分布云图

为了防止冬季路面结冰,需要防冻系统在规定时间内将路面温度上升到一定温度才能达到防冻的目的。因此,在计算时对路面埋管换热性能的评价指标是路面最不利点达到防冻所需温度或者热通量时的换热量需求和运行时间。如图6是在图5工况条件下,模型运行10 h后路面的温度场分布。从图中可知,在不考虑路面边缘不影响车辆通行的区域,系统在换热过程中的最不利温度位于相邻U型管中间的位置。因此,该模型选取了系统运行10 h后距离路面边线1 m处相邻U型管中间平面与路面面层交线上的点进行温度监测。

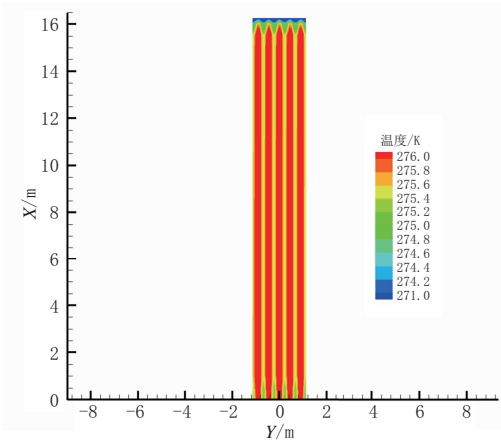


图6 10 h后路面温度场分布图

3.2 埋管间距对路面埋管换热性能影响分析

根据相关计算方法及研究成果^[9,10],对于南京地区,在风速4 m/s,降雪强度1 mm/h条件下,道路融雪需要满足的热通量值如图7所示。

将不同埋管间距条件下,满足路面最不利点热通量所需的进水温度放入同一张图中显示(见图8)。在满足相同防结冰指标时,当埋管进出水口间距a=10 cm不变,U型埋管间距由b=20 cm增加到35 cm

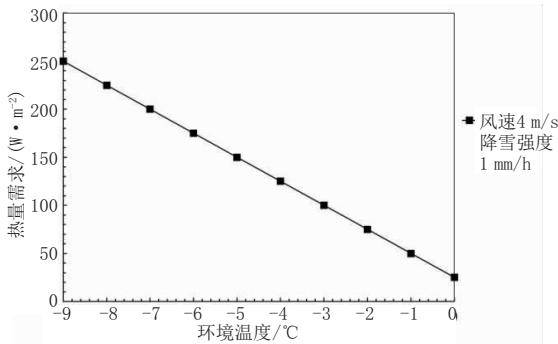


图 7 满足融雪条件单位面积热功率与环境温度关系图(南京地区)

时,所需最低进水温度有较大的增加,而且随着环境温度的降低,其增加值越明显。例如在环境温度为 -1°C 时,工况②比工况①所需进水温度只增加了 3°C ,而当环境温度为 -5°C 时,工况②比工况①所需进水温度却增加了 10.5°C 。当 U 型埋管间距 $b=35\text{ cm}$ 不变,路面埋管进出水口间距 a 由 10 cm 增加到 25 cm 时,在满足相同防结冰指标时,埋管进出水口间距增加,所需最低进水温度差别却不明显。由此可知,在一定范围内,相邻 U 型管的间距是影响路面埋管防结冰系统效果的主要因素,进出水口间距变化对埋管防结冰系统效果影响并不明显。

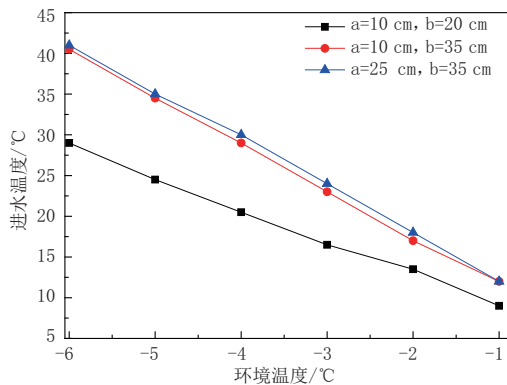


图 8 不同埋管间距下,满足相同防结冰指标所需的进水温度曲线图

同时可以看出,较小的 U 型管进出水口间距与相邻 U 型管间距可以使换热管的入口水温在一个较小值就能够满足路面融雪防结冰的需求,但是考虑到较小的埋管间距带来的是埋管数量的增加,进而大大增加材料与敷设成本。相比于 $a=10\text{ cm}, b=20\text{ cm}$ (方案一)的埋管敷设方案, $a=25\text{ cm}, b=35\text{ cm}$ (方案三)的埋管敷设方案能够使路面下埋管数量减少一半,而方案三所需的最低入口水温只比方案一高 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。由此可见,在满足换热性能的基础上,方案三性价比是最佳的。

6 结 语

针对利用隧道结构提取浅层地热能用以路面融雪防结冰的系统,基于隧道敞开段结构特点提出隧道下路面埋管的总体敷设方案。在总体方案的基础上,通过建立道路下埋管数值模型,分析了路面埋管总体换热特点,以及埋管间距对路面埋管换热性能的影响。结果表明:

- (1)路面下换热管宜敷设在混凝土铺装层中,并与路面坡度平行敷设并垂直于道路走向。
- (2)在一定范围内,相邻 U 型管间距是影响路面埋管防结冰系统效果的主要因素,进出水口间距变化对埋管防结冰系统效果影响并不明显。
- (3)最后分析得到了本文所依托工程的最佳性价比的埋管敷设方案,给类似工程应用提供了思路。

参考文献:

[1] Chen M Y, Wus P, Wang H, et al. Study of Ice and Snow Melting Process on Conductive Asphalt Solar Collector[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2011(95):3241-3250.

[2] 赵方冉,杜拾妹,刘新琛,等.不同除冰工艺对机场水泥混凝土道面的损伤特性[J].交通运输工程学报,2015,15(4):18-25.

[3] Hoppe E J. Evaluation of Virginia's First Heated Bridge [R]. Charlottesville: Virginia Center for Transportation Innovation and Research,2000.

[4] Zhao W K, Zhang Y, Li L, et al. Snow melting on the road surface driven by a geothermal system in the severely cold region of China - ScienceDirect[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020(40):1-7.

[5] Bowers G A , Olgun C G . Ground-Source Bridge Deck Deicing Systems Using Energy Foundations[C]// Geo-Congress 2014, 2014:2705-2714.

[6] 党政,关文,程晓辉,等. CFG 能源桩用于混凝土路面除冰降温的试验研究[J].中国公路学报,2019,32(2):19-30.

[7] 黄俊,董盛时,季红玲,等.基于能源桩的城市隧道路面融雪防结冰技术探究[J].隧道建设(中英文),2021,41(9):1468-1477.

[8] 夏才初,朱建龙,曹诗定.地下连续墙内热交换管引起的温度应力研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):90-95.

[9] 胡文举.基于土壤源热泵桥面融雪系统的基础研究[D].哈尔滨工业大学,2006.

[10] [瑞士]吕塞·拉卢伊,何莉塞·迪·唐(孔纲强等译).能源地下结构工程创新技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.

[11] Bourne-webb P J, Freitas T M B, Goncalves R A D C. Thermal and mechanical aspects of the response of embedded retaining walls used as shallow geothermal heat exchangers [J]. Energy & Buildings, 2016(125):130-141.