

寒区隧道竹缠绕排水管保温设计及效果分析

段利宾¹,康强强²,杨战胜²,高岳³,陈群³,杜耀辉³

(1.中铁二十一局集团有限公司,甘肃 兰州 730070;2.中铁二十一局集团第四工程有限公司,青海 西宁 710065;

3.兰州交通大学土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:针对寒区隧道中心排水管发生冻结问题,以兰州市某隧道为工程背景,研究新型竹缠绕中心排水管的周边温度场和保温性能。利用数值模拟软件建立两种中心排水管模型进行计算对比,并结合现场监测数据,提出合理的排水管道设计参数。结果表明:(1)采用浅埋中心排水管设计方案能有效改善竹缠绕排水管道周围的温度场,并验证方案可行性;(2)采用竹缠绕排水管道,使低温环境下最大冻深不超过90 cm;(3)通过现场应用竹缠绕排水管道具有良好的抗冻保温效果,具有一定的推广意义。

关键词:寒区隧道;中心排水管;竹缠绕管;温度场分析

中图分类号: U453.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)09-0283-05

0 引言

近年来,随着我国大量寒区隧道的修建,在低温环境下,寒区隧道中心排水管极易发生管内水流冻结现象,以致后期出现排水管冻结堵塞,严重影响了隧道结构的受力和运营状况。若隧道围岩为泥岩地质,在运营过程中一旦发生局部渗水,还可能会造成围岩膨胀、地面隆起现象。因此,急需采用合理的排水方案、施工材料和保温措施,保证中心排水管的通畅和结构完整,继而保证寒区隧道的正常排水和运营。

目前,许多学者对寒区隧道进行了一系列研究。在铁路隧道中,丁然^[1]以天秀山铁路隧道为依托,利用数值模拟研究了洞口段的温度场分布和抗冻保温设计。陈利平^[2]以张呼铁路隧道为背景,介绍了隧道中心深埋水管的排水施工相关技术。陈志杰^[3]以红土山隧道为依托,利用数值模拟研究了不同排水结构的温度场分析,结合现场监测数据提出了合理的排水结构方案。在公路隧道中,卫锋等^[4-5]以府村川隧道为依托,介绍了黄土隧道的排水设计的施工工艺。李善豪^[6]总结了公路隧道传统排水结构的缺陷,提出排水管由路面中部调整为路面两侧侧管,缩短横向排水管路路径的优化排水设计方案。林春茂^[7]以

马咀隧道为例,对纵向排水管的施工工艺进行优化分析,解决了施工中的排水堵塞问题。王志杰等^[8]以金家庄隧道为依托,利用数值模拟研究不同形式的排水管,并结合理论分析计算4种排水设计范围。刘龙卫等^[9]针对阿尔金山隧道的防排水问题,采用数值模拟提出了一种环向盲管保温排水结构体系。付国茂^[10]依托寒区隧道介绍了聚氨酯保温层的施工工艺和防排水措施。杨明宇等^[11]以京新高速的某公路隧道为依托,通过现场监测分析了中心排水管、检查井和横向排水管处的温度分布特征。王增运^[12]以乌鞘岭隧道为依托,提出隧道冻害防治的一些治理措施,并介绍了目前隧道加热的新技术。

综上所述,目前国内外学者对在寒区隧道中采用新型竹缠绕复合材料的研究较少,尤其是在易冻结堵塞的中心排水管尚未有人进行过尝试。通过现场调研和现场监测发现了业界既有深埋水管的设计方案易导致管沟冻结堵塞、仰拱基岩围岩松弛破坏等现象。因此,本研究提出一种浅埋中心排水管设计方案,并采用新型竹缠绕复合排水管。其具有良好的抗结晶性能和抗冻性能,不易发生排水管冻结堵塞现象。此外,还利用数值模拟求解了温度应力场,通过监控量测数据对比分析了优化前后的排水方案,最终确定了隧道中心排水管较为合理的设计。

1 工程概况

隧道起讫里程 DK121+330 ~ DK122+228.74,长

收稿日期:2023-09-11

作者简介:段利宾(1985—),男,本科,高级工程师,从事铁路桥梁、隧道、路基施工技术及管理工作。

898.74 m,洞身最大埋深 85 m,为双线隧道。线路纵坡为 4%的上坡。洞身通过的地层主要为第四系全新统冲洪积砂质黄土,第四系上更新统风积砂质黄土,冲积砂质黄土、细圆砾土、粗圆砾土,下伏为上第三系上新统泥岩。由于泥岩、泥岩夹砂岩具有微膨胀性,仰拱曲率在常规断面上加深 60 cm。

2 中心排水管设计方案分析

2.1 优化前的施工设计方案

隧道采用双侧保温水管+中心深埋水管,中心深埋水管每隔 30 m 左右设一处 100 cm×100 cm 的矩形检查井,检查井底距排水管底 20 cm,排水管设置 C20 混凝土基座,详细构造如图 1 所示。水管坡度与线路坡度一致,环向设置 Φ50HDPE 打孔盲管,纵向上设 Φ100HDPE 打孔纵向盲管,并通过边墙泄水孔连接至中心深埋水管内。

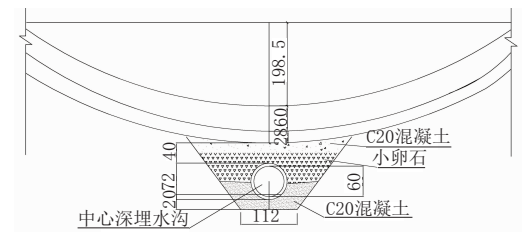


图 1 优化前中心排水管设计示意图(单位:mm)

2.2 优化后的施工设计方案

隧道内全长设置双侧双层保温水管+中心水管,如图 2 所示。双层盖板之间加聚氨酯保温材料,中心水管自隧道进口端开始,每隔 35.1 m 设置 1 处 100 cm×100 cm 的矩形检查井,排水管置于检查井底。洞口处设置 1 处检查井,将洞内两侧盲管中的水通过 PVC 管(Φ100 mm)汇集至洞内检查井,再将横向排水管直接引入中心竹缠绕复合管。

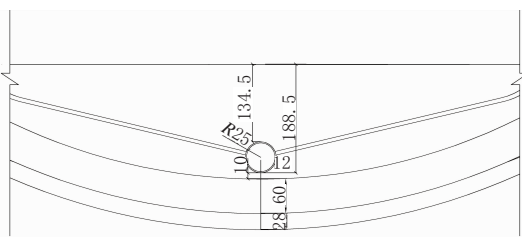


图 2 优化后中心排水管设计示意图(单位:mm)

中心排水管采用竹缠绕复合排水管。竹缠绕复合管是一种采用竹子作为基材,利用树脂作为胶黏剂,通过缠绕工艺制成的复合管道。竹缠绕复合管的结构示意图如图 3 所示。内衬层由具有优异防腐性能的树脂和竹纤维无纺布构成,增强层采用薄竹片和水性树脂,外保护层则选用具备防水、抗腐蚀和抗

老化性能的树脂材料。

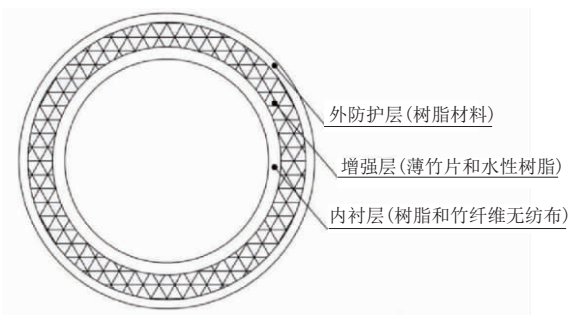


图 3 竹缠绕复合管结构示意图

3 温度场数值模拟

3.1 模型的基本假定

- 在建立有限元模型时,作出如下假定:
- (1)研究范围内混凝土和竹缠绕为均质材料且各节点的发热率相同。
 - (2)假定管体和混凝土的初始温度为定值。
 - (3)未施加保温措施的情况下,竹缠绕管材和混凝土的表面放热系数相同。
 - (4)不考虑竹缠绕管中水体的流动引起的降温作用。

3.2 模型建立

隧道中心排水管采用新型的竹缠绕复合材料,形式为圆形结构。竹缠绕管壁厚 2 cm,距离拱底 10 cm。管上方浇筑混凝土 85 cm,有砟轨道铺设 40 cm。

- 研究采用两种排水方案进行数值模拟。
- 方案一:设置深埋中心水管。深埋有砟轨道顶面下方 3.875 m。模型上表面宽 12 431 mm,下表面宽 1 120 mm,高 4 415 mm。具体断面尺寸如图 4 所示。
- 方案二:设置浅埋中心水管。深埋有砟轨道顶面下方 1.345 m。模型上表面宽 5 970 mm,下表面宽 1 120 mm,高 1 345 mm。具体断面尺寸如图 5 所示。

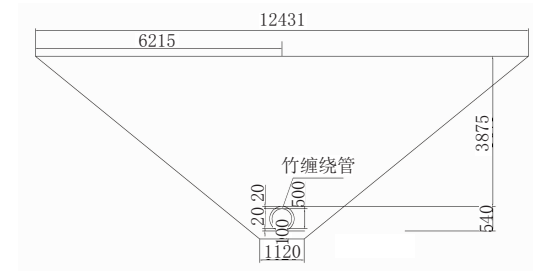


图 4 优化前模型建立尺寸(单位:mm)

3.3 计算参数

由于热传导分析需要确定材料的比热容及热传导率等相关参数,根据《竹缠绕复合管》(GB/T 37805—2019)^[13]得出竹缠绕复合管在低温状态下的热物理参数(见表 1)。

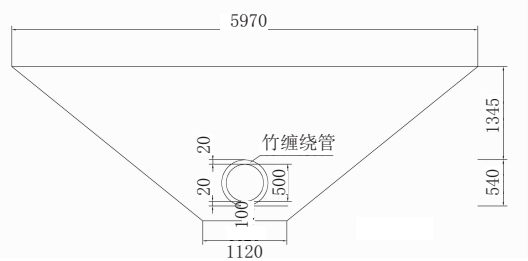


图 5 优化后模型建立尺寸(单位:mm)

表 1 热物理参数

类型	密度 / (kg·m ⁻³)	热传导系数 / [W/(m·k)]	比热容 / [J/(kg·k)]
C30 混凝土	2 400	1.3	1 000
竹缠绕管	1 100	0.002 6	1 200

3.4 边界条件

在温度场计算中,整个热传递过程采用瞬态热传递分析,边界条件如下:

- (1)建立竹缠绕管和混凝土体的热传递的相互作用两者接触对为热传导。
- (2)上方界面地表温度依据实测气温,下方界面初始温度场依据实测地温。
- (3)其余界面设为绝热,混凝土体和竹缠绕管道设为 10℃。
- (4)确定时间步为 28 d,子步为 56 步,每步 0.5 d。
- (5)洞外环境温度为 -15℃,洞内空气温度为 -4.18℃,洞内地表温度为 -5.5℃。
- (6)模型建立底层温度依据现场 2 月实测进行非线性拟合,拟合公式为:

$$y = -199.36e^{\frac{x}{5.47}} + 118.75 \tag{1}$$

式中: x 为地层温度,℃; y 为埋深,cm。

3.5 数值模拟计算结果数据分析

数值模拟以 2022 年 2 月现场实测右线地温的最低温度作为模型下方界面的初始温度场。分析一个月内优化前后方案采用竹缠绕管道的温度场变化规律。

3.5.1 低温作用下整体温度场分析

为了解两种方案条件下竹缠绕管在深埋和浅埋处的温度分布变化特征,经数值模拟计算得温度场云图如图 6 和图 7 所示。

如图 6 和图 7 所示,采用深埋排水管时,在 2 月份的混凝土体最低温度为 -5.5℃,最高温度为 9.05℃。此时竹缠绕管道顶端为 7.41℃,底端为 2.63℃。采用浅埋排水管时,混凝土体在 2 月份的最低温度为 -5.5℃,最高温度为 3.12℃。此时竹缠绕管道顶端为 2.49℃,底端为 2.57℃。分析其原因:在地

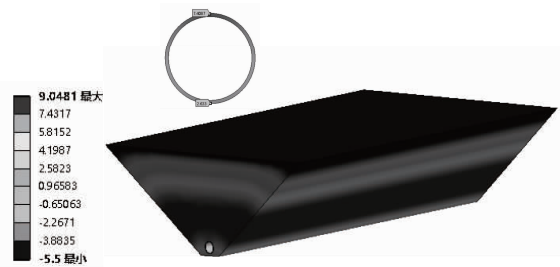


图 6 2 月份深埋整体温度场云图



图 7 2 月份浅埋整体温度场云图

表浅层受环境温度影响较大,模型温度较低;埋深越大,地表受温度影响越小,故模型整体温度较高。

由数值模拟结果可得,采用方案二,即隧道中心排水管路深为 1.345 m 时,其竹缠管顶端温度场较深埋下变化较小,竹缠绕管口断面处中心排水管路顶端温度值在 3℃附近,在洞内其他断面处,中心排水管路周围的温度值均为正值(0℃以上),表明了中心排水管路使用竹缠绕管材可以有效阻止管内水流冻结,有着较好的抗冻保温的效果,且所选取的 20 m 纵向进深范围内的竹缠绕管道的温度值也高于 0℃,故可使得管内水沿纵向正常排出,从而保证了排水管的通畅。

3.5.2 方案一地层温度场结果分析

选取 2022 年 2 月温度场进行分析。为方便观察排水管路处竹缠绕管的负温区分布,以下仅显示埋深为 80~110 cm 的温度场,如图 8 所示。

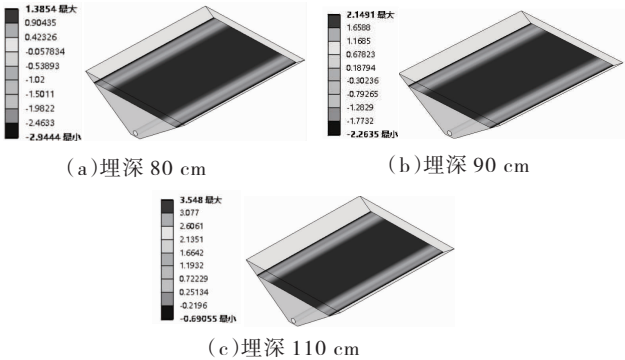


图 8 方案一不同埋深下温度分布云图

由图 8 可知,隧道深埋中心排水管的温度在 0℃以上,且随着埋深的增加,竹缠绕管顶部位置温度逐渐增大。深埋排水管距地面下方 3.875 m 处,可以使中心排水管路四周正温分布,以使管内水不会冻结,但现场隧道地质为泥岩,具有膨胀性或遇水软化,当运

营过程中深埋水管出现局部渗水,可能造成泥岩膨胀使无砟轨道上部拱起,带来安全隐患,且病害处理困难。为避免类似问题发生,本文将深埋水管提升至仰拱内,使其与泥岩地质隔离。

3.5.3 方案二地层温度场结果分析

图 9 为采取中心排水管浅埋下每隔 10cm 的埋深温度分布云图。

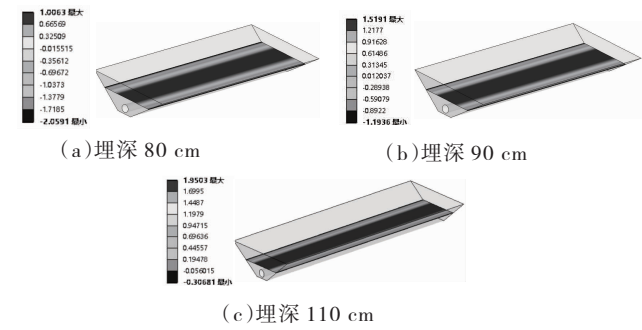


图 9 方案二不同埋深下温度分布云图

由图 9 可知,将中心排水管移至到仰拱上方处,从地面到底层温度梯度为正值分布,随着埋深的增加,中心排水管处的温度也随着增大,即可以有效改善排水管处的温度场,竹缠绕管道四周也可达到 0℃ 以上,表明采取浅埋设置方案可以满足保温抗冻性能。

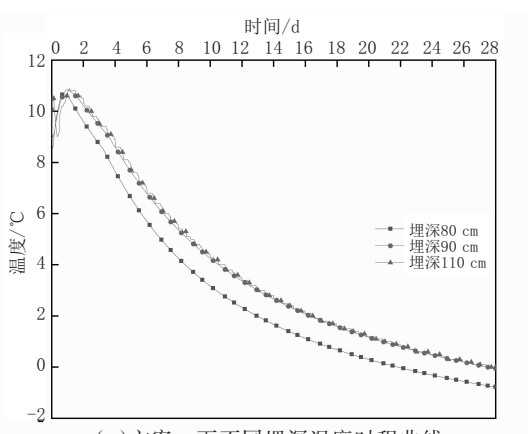
3.5.4 现场验证与分析

现场的竹缠绕管道周围温度场是由环境温度和温度梯度共同作用的复合温度场。为了探索低温环境下预埋的竹缠绕复合管的温度场的变化规律,本文对隧道 K121+370 基底混凝土基础进行温度监测,在距离洞口 40 m 处埋设杆式温度传感器 11 个测点,深度 1.1 m。在传感器埋设完毕后,通过太阳能板连接耐低温胶体电池为系统机箱供电,监测时间为 2022 年 2 月,对右线地温进行了一个月的信息化监测。

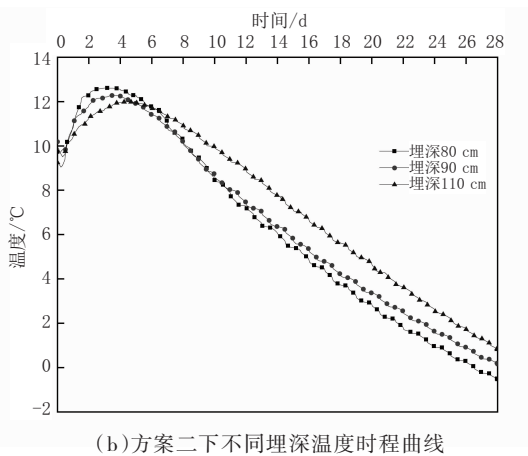
通过数值模拟提取两种方案在 80 ~ 110 cm 下埋深的温度时程曲线,如图 10 所示。

由图 10 可知,随着埋深的增加,两种方案中的温度都呈整体上升趋势。在 28 d 时,深埋中心排水管理深 80 cm 处的最低温度为 -0.78℃。此时中心浅埋水管处最低温度为 -0.39℃。同理,中心深埋水管上方距离地面 110 cm 位置处的最低温度为 1.43℃,而中心浅埋水管处最低温度为 0.99℃。表明采取浅埋方案施工可以达到竹缠绕管道的保温抗冻效果。

由图 10 可得,受外界气温波动的影响,埋深 80 ~ 90 cm 地温具有一定的波动性,尤其地表温度受



(a)方案一下不同埋深温度时程曲线



(b)方案二下不同埋深温度时程曲线

图 10 两种方案下温度时程曲线

气温影响波动最大,埋深 90 cm 以下地温受外界气温影响小,变化较为平缓,其变化规律可分为 3 个阶段,即“温度迅速上升阶段—温度缓慢下降阶段—温度达到准稳定阶段”。

通过现场 K121+370 断面,距离洞口 40 cm 处,由现场所测 2 月份的右线地温数据,与浅埋方案施工后在距地表 80 ~ 110 cm 的数值模拟的温度值进行对比,分析竹缠绕管浅埋施工的可行性。

由表 2 可知,选取最低地温的时间段 2 月进行数值模拟,通过与现场监测数据对比发现,方案二在埋深 100 cm 处最低温度为 0.98℃,现场实测右线在埋深 100 cm 处最低温度为 0.15℃,此处地层温度大于 0℃,验证了数值模拟与现场实测结果基本一致。表明了该时间段最低地温下最大冻深不超过 90 cm,对于竹缠绕管道周围位置处的土壤,其温度变化的幅度由来自竹基缠绕复合管的热量和其他外界散失的热量,表明了竹缠绕复合管道具有一定的抗冻保温作用。

4 结 论

通过现场数据,利用数值模拟对两种排水管方

表 2 方案二模拟结果与现场监测结果对比

埋深 /cm	方案二最低温度 /℃	K121+370 实测右线最低温度 /℃
80	-0.39	-0.51
90	0.32	-0.16
100	0.98	0.15
110	0.99	0.37

案进行了温度场分析,得到以下结论:

(1)优化前后中心排水管均能达到保温性能,但现场深埋处于泥岩地质,易发生地基膨胀问题,故采用浅埋方案后排水管处温度均达到正值。

(2)竹缠绕管道在低温环境下整体温度顶端为 2.49℃,底端为 2.57℃,说明竹缠绕管在低温下具有良好的抗冻效果,满足排水要求,适合在低温环境下使用。

(3)通过地层温度场分析,两种方案下,随着埋深增加,竹缠绕管道周围温度呈正值,且最大冻深不超过 90 cm,表明现场采用浅埋设计方案比较合理。

(4)现场温度监测表明,管内外温差较大,在本观测期内,竹缠绕管道最大冻结深度在 90 cm,验证了数值模拟与现场实测结果基本一致,竹缠绕管具有一定的保温抗冻性能。

参考文献:

[1] 丁然.京沈高速铁路支线天秀山隧道洞口段的防冻保温技术[J].铁道建筑,2020,60(10):68-72.

[2] 陈利平.严寒地区隧道深埋中心排水管施工技术[J].中国新技术新产品,2018(1):107-108.

[3] 陈志杰,任广丽,闫世豪,等.高海拔寒区隧道排水结构温度场数值分析[J].中国公路,2019(12):106-109.

[4] 卫锋.公路黄土隧道防排水施工技术探究[J].住宅与房地产,2017(29):196.

[5] 李琨,卫锋,韩冰凌.浅谈公路黄土隧道防排水施工技术[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(7):86-87.

[6] 李善豪.公路隧道排水管阻塞处理施工技术研究[J].中国高科技,2021(5):104-105.

[7] 林春茂.马咀隧道纵向排水管施工方案优化[J].绿色环保建材,2019(3):146-148.

[8] 王志杰,李金宜,蔡李斌,等.寒区隧道不同形式排水管适用性研究[J].公路,2020,65(9):288-295.

[9] 刘龙卫,孙源.寒区隧道新型环向盲管排水体系及温度场分析[J].高速铁路技术,2020,11(4):55-59,104.

[10] 付国茂.高寒地区隧道保温防排水技术与应用[J].黑龙江交通科技,2020,43(10):131-132.

[11] 杨明宇,王晓宇.寒区隧道排水系统冻害分析及防冻措施研究[J].北方交通,2022(7):80-84.

[12] 王增运.乌鞘岭高海拔地区隧道冻胀机理及防冻措施研究[J].城市道桥与防洪,2020(7):240-243.

[13] GB/T 37805—2019,竹缠绕复合管[S].

(上接第 270 页)

[2] 康健.沥青路面超薄磨耗层层间粘结强度试验分析[J].交通科技,2016(2):115-118.

[3] 咸红伟,陈富达.碾压组合工艺对沥青面层压实度与抗滑性能的综合影响[J].广东公路交通,2021,47(1):6-11.

[4] 虞将苗,陈富达,彭馨彦,等.高韧超薄沥青磨耗层在港澳大桥珠海人工岛通道上的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(1):48-56.

[5] SU Tingting, GUO Runhua, QIAO Xiaobing, et al. Premature pavement distresses of cracks and rutting analysis and mechanical analy-

sis in ultra-thin asphalt pavement[J]. Geotechnical Special Publication,2014,239:167-178.

[6] 蓝剑秋.超薄罩面磨耗层技术在沥青路面工程的应用[J].福建交通科技,2022(12):45-48,58.

[7] 刘瀚.超薄沥青罩面加铺层路用性能检测评价[J].山西交通科技,2022(1):23-25.

[8] YU Jiangmiao, CHEN Fuda, DENG Wen, et al. Design and performance of high-toughness ultra-thin friction course in south China[J]. Construction and Building Materials,2020,246:118508.