

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.01.018

石墨粉对高速铁路整体道床温度分布规律的影响研究

唐先习,王要武,戚彦福,蒙富佳,杨昊

(兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:通过在整体道床混凝土内添加导热性能良好的石墨粉的方式,分析石墨粉对整体道床内温度分布规律的改善状况。由于石墨粉的添加会降低混凝土强度,因此再添加一定量的碳纤维进行混凝土强度补强。试验时制作普通整体道床和添加石墨粉、碳纤维的整体道床,通过对比同环境下两种整体道床温度分布规律的差异,研究石墨对整体道床温度分布规律的影响。试验得到两种道床板的温度分布规律数据。结果表明,添加石墨粉对整体道床温度分布规律具有积极的影响,石墨粉的掺入提高了整体道床的导热系数,从而降低整体道床的温度梯度,减小了由于温度梯度造成的温度应力,降低了整体道床混凝土的开裂概率,有助于提升整体道床的力学性能和耐久性。

关键词: 温度梯度;整体道床;温度分布;石墨粉

中图分类号: TU528.79

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)01—0107—07

Influence of Graphite Powder on the Temperature Distribution of Monolithic Track Bed of High-speed Railway

TANG Xianxi, WANG Yaowu, QI Yanfu, MENG Fujia, YANG Hao

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: By adding graphite powder with good thermal conductivity into the monolithic track bed concrete, the improvement of the graphite powder on the temperature distribution in the monolithic track bed is analyzed. Because the addition of graphite powder will reduce the strength of concrete, a certain amount of carbon fiber is added to strengthen the concrete strength. During the experiment, an ordinary monolithic track bed and a monolithic track bed added with graphite powder and carbon fiber are made, and the effect of graphite on the temperature distribution of the monolithic track bed is analyzed by comparing the temperature distribution of the two monolithic track bed under the same environmental conditions. The experiment has obtained the temperature distribution law data of the two kinds of track bed. The results show that the addition of graphite powder has a positive impact on the temperature distribution of the monolithic track bed. The incorporation of graphite powder increases the thermal conductivity of the monolithic track bed, thereby at the same time reducing the temperature gradient of the monolithic track bed, and reducing the temperature stress caused by the temperature gradient. The cracking probability of the monolithic track bed concrete is improved, which helps to maintain the mechanical properties and durability of the monolithic track bed.

Keywords: temperature gradient; monolithic track bed; temperature distribution; graphite powder

收稿日期:2020-09-17

修稿日期:2020-10-21

基金项目:国家自然科学基金“考虑人群-结构-环境耦合作用缆索式人行桥随机振动疲劳性能研究”(51868046);中国铁路兰州局集团有限公司科技研究开发计划项目:西北地区无砟轨道在复杂温度条件下的温度与应力分布规律以及应力控制措施的研究(ky2019047)

作者简介:唐先习(1972—),男,甘肃兰州人,博士,副教授,主要从事混凝土结构耐久性方面的工作。E-mail:695913483@qq.com

通讯作者:王要武(1994—),男,河南许昌人,硕士研究生,研究方向为混凝土结构耐久性。E-mail:wangyaowu777@163.com

随着我国高速铁路的迅速发展,无砟轨道技术越来越多的应用于铁路的建设中。整体道床作为无砟轨道的主要结构形式,具有维护工作量少、结构简单、整体性好等诸多优点。但整体道床作为平铺在铁路基层上的连续的钢筋混凝土板结构,对温度影响的反应较为敏感。温度变化导致的温差可以使整体道床产生温度应力,该应力较大时会导致整体道床混凝土产生开裂,对整体道床的力学性能和耐久性产生较大的影响。特别是在我国西北的广大地区,由于昼夜温差大、季节温差大的环境条件,导致这一问题更加突出。因此,必须加强该地区整体道床温度分布规律的研究。

国内外学者对整体道床温度分布规律进行了较多的研究。在这方面,苏成光^[1]通过相关研究指出,道床板作为整体连续性结构,当降温作用于其内部,温差过大产生的温度应力大于混凝土抗拉性能,将不可避免造成道床板混凝土开裂;并通过计算分析得到双块式无砟轨道道床板的早期温度场分布规律。赵坪锐等^[2]通过建立双块式无砟轨道有限元模型,模拟了道床板早期温度场和温度应力的分布情况,指出整体道床和轨枕边缘处在浇筑后 30 h ~ 96 h 内容易产生大于混凝土抗拉强度的温度应力,从而导致混凝土开裂。因此双块式无砟轨道在运营期间,计算轨道温度场的最大降温幅度对无砟轨道的设计、施工和维护是极其必要的^[3]。

搜集文献资料发现对加入导温改性材料后道床板温度分布影响的相关研究较少,本试验以此为题研究导温改性材料对道床板温度分布影响。在改性材料对混凝土构件导热系数提高的资料中发现石墨粉作为导温改性材料性能突出。潘飞^[4]通过对比试验指出添加 2% 体积掺量钢纤维、3% 体积掺量石墨粉的混凝土相对普通混凝土其导热系数提高 105.2%。王冲^[5]通过研究指出水泥基回填材料内掺 3% 体积掺量的天然石墨粉,导热系数增大 17.8%。屈春来等^[6]指出随石墨粉掺量增加混凝土的导热系数持续增大,但会造成坍落度和抗压强度的下降,混凝土导热系数增大原因在于细骨料和石墨粉之间排列紧密形成连续的导热通道。综上所述可知掺加石墨粉的混凝土导热系数提高的同时混凝土强度有所降低;考虑石墨粉带来混凝土强度下降的缺点,试验选择碳纤维作为力学改性材料弥补这一缺点。关于碳纤维的掺量在改善混凝土力学性能这方面,杜向琴等^[7]通过试验研究发现,混凝土中添加合适体积率的碳纤维,对于混凝土的脆性破

坏有较好的改善作用。岳彩兰^[8]通过试验研究表明,9 mm 碳纤维在减小混凝土坍落度、提高强度方面,均有显著的作用。当碳纤维在混凝土中的体积掺量为 0.24% 时,混凝土试块出现了强度的最大值,抗压强度值比素混凝土提高了 10% 左右。此外,碳纤维在试验中还表现出了较好的阻止裂缝延伸的作用,其体积掺量控制在 0.20% ~ 0.24% 之间效果最佳。文献^[9]指出碳纤维和混凝土的热膨胀系数相对混凝土的热变形具有约束的作用;且碳纤维的导热系数高于混凝土,作为改性材料乱向分布于混凝土中对道床板的导热系数不会产生降低影响。综合石墨粉和碳纤维的优缺点,将石墨粉和碳纤维组合为一组改性材料。

基于前人对道床板温度场的分布特点研究,以及石墨粉、碳纤维做为改性材料对混凝土性能的影响研究,据此将加入碳纤维、石墨粉改性材料的道床板与普通混凝土道床板进行对比,从凝结硬化阶段温度分布规律入手,分析了半年时间内整体道床轨枕边缘的温度分布和温度梯度变化,研究了改性材料对整体道床温度场的影响。

1 试验方案与温度场理论

1.1 试验方案概述

如图 1 所示试验设置改性和普通道床板两种。道床板外部条件相同,内部条件除了是否添加石墨粉和碳纤维其它相同。石墨粉改性材料采用青岛煜宸公司生产的未改性高纯度 6.5 μm 石墨粉,导热系数为 80 W/(m · K) ~ 150 W/(m · K),密度为 0.8 g/cm³,纯度为 95%,结合文献^[4-6]石墨体积掺量定为 3%;碳纤维采用上海力硕生产的短切 10 mm 碳纤维,直径为 9 μm ,密度 1.75 g/cm³,抗拉强度和抗拉模量为 3.5 $\times 10^3$ MPa 和 2.3 $\times 10^5$ MPa,伸长率为 1.5%,结合文献^[7-9]不同体积掺量的碳纤维对混凝土性能影响的研究,碳纤维体积掺量定为 0.2%。具体换算后的两种道床板的材料实际用量见表 1。

表 1 道床板材料用量表

道床种类	材料种类	用量
普通混凝土道床板	C40 混凝土/m ³	1.5
	C40 混凝土/m ³	1.5
改性混凝土道床板	石墨粉/kg	34.0
	碳纤维/kg	5.0

试验场地位于甘肃省兰州市,轨枕为 CRTS II 型

双块式预制轨枕,钢筋为 $\Phi 16$ 、 $\Phi 20$,道床板尺寸为(长 \times 宽 \times 高 2.8 m \times 2.05 m \times 0.25 m),和实际工程中保持一致。道床板内部温度用 SHT20 温湿度传感器采集,表面温度用 Pt100 贴片式传感器采集,试验设置两个对照测区,普通混凝土为“T 测区”,石墨粉和碳纤维混凝土为“GP 测区”。道床横向测点布置分为 I 区(整体道床边缘)、II 区(整体道床横向 1/4 部位)、III 区(整体道床板横向中部),每层测点编号为 1—9;竖向从上到下分四层,以 T1 测点为例,T1 1 为面层、T1 2 为上层、T1 3 为中层、T1 4 为下层,计算温度梯度时 T1 1—2 代表 0~5 cm 范围、T1 2—5 代表 15 cm 范围、T1 3—4 代表 15 cm~20 cm 范围,测点布置和道床尺寸见图 1。模型浇筑完成后对道床板各测点温度进行为期 180 d 采集。

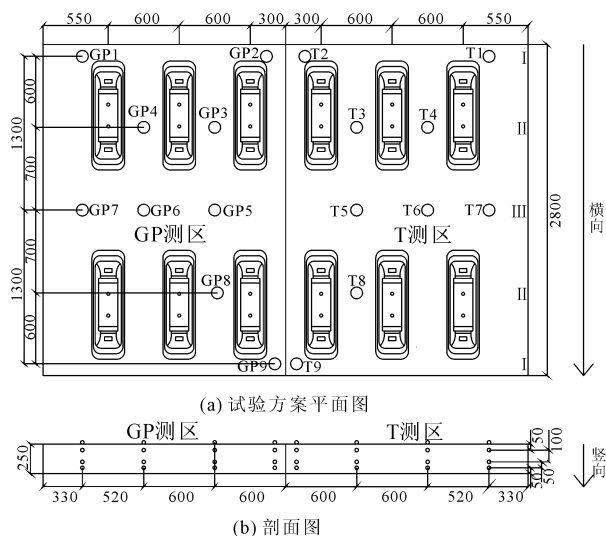


图 1 试验布置图(单位:mm)

1.2 温度场理论基础

1.2.1 热传导平衡

整体道床内部的温度在不同时段存在正、负温度梯度,且随季节变化有所差异。根据气象因素对整体道床温度场的影响^[10],一天内正温度梯度平均持续约 11 h,负温度梯度平均持续约 13 h。温度场的确定从研究热量的传导过程出发,热量在整体道床内部传导遵循能量守恒定律。混凝土整体道床的内热源即混凝土内部水泥水化热,混凝土整体道床在凝结硬化阶段,水化热用于提高自身温度。

分析发现,在水化作用下,混凝土在绝热条件下自身内部的温度上升速度为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{W}{c_p \rho} \quad (1)$$

式中: c_p 为质量定压热容; ρ 为物体自身密度; W 为水

泥用量; θ 为绝热升温温度; t 为时间。

混凝土整体道床结构热传导微分方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

式中, $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$, $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$, a 为导热系数。

1.2.2 初边值定义及温度场求解原理

参考朱伯芳^[11-13]和文献[14-16]结合热力学相关理论研究了热量在固体中的传导过程,并通过试验与理论结合的方式,分析了早期混凝土结构内部由于温度引起的温度场和温度应力变化,建立了混凝土早期水化模型。根据前人在研究混凝土结构和温度作用的初边值定义及温度场求解原理,考虑整体道床板实际工况,据此对于整体道床板按照二维平面问题来解答温度变化规律。

(1) 初边值条件定义。热传导微分方程包括时间坐标变量和空间坐标变量,为了定解整体道床温度场函数,考虑时间边值条件(即初始条件)和空间边值条件(即边界条件)。初始条件为:

$$T|_{t=t_0} = T_0(P) = f(x, y) \quad (3)$$

式中, $P = P(x, y)$,表示二维平面中的点或坐标量。

考虑到整体道床在空间上的存在形式,采用第二类边界条件,即当混凝土与空气接触时,边界上各点热流密度为时间的函数,试验中整体道床表面混凝土结构与空气密切接触,因此,研究整体道床温度场用第二类边界条件较为合适。

(2) 按照分离变量法原理解温度场函数。考虑到无砟轨道整体道床板的结构形式,其沿着长度方向可视为无限长,按平面问题求解,即以道床面边缘位置为坐标原点建立温度场边界。考虑到温度场在混凝土整体道床内部按照空间域和时间域这两个维度发展变化,而且热传导是双向进行。因此,结合初始条件和边界条件,并采用分离变量法将多变量分解为单个变量求解,即可得到整体道床温度场在空间和时间上的变化规律。

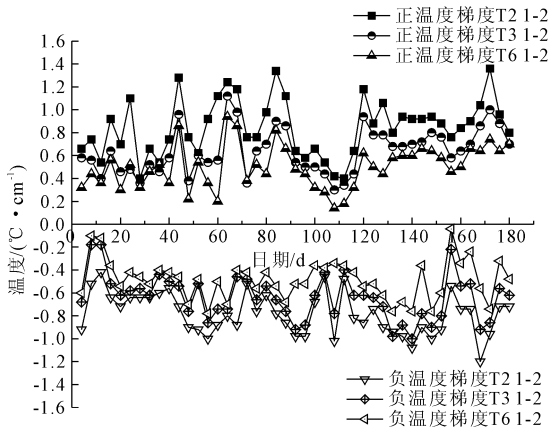
2 试验数据分析

道床温度试验数据分析的方式,采用横向和竖向的对比分析方式找出普通道床板和改性道床板温度分布规律的不同和相同点。通过横向分析找出道床板温度在横向的分布规律,结合道床板温度横向分布规律对道床板竖向温度分布规律进行细化分析。并在此基础上对比两种道床板横向和竖向温度分布

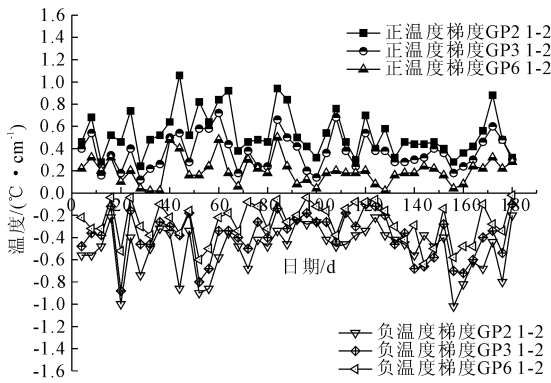
规律,探讨石墨粉对道床板温度分布规律的影响。

2.1 道床板横向温度分布规律分析

道床板横向温度试验数据分析,如图 2 所示。图 2 中试验数据取自两种道床板横向 2、3、6 测点竖向的面层和上层(0~5 cm 范围)之间温度梯度进行对比分析。



(a) 普通道床板横向测点温度梯度



(b) 改性道床板横向测点温度梯度

图 2 整体道床板横向测点温度梯度曲线图

由图 2 可知整体道床温度场的横向温度梯度沿着道床板横向越向内部发展温度梯度变化越小,横向 II 区和 III 区温度梯度变化较小, I 区位置温度梯度变化最大,对轨道结构的整体性能影响较大。将图 2(a)和图 2(b)对比分析可知,无论是掺加石墨粉、碳纤维改性材料的道床板还是普通混凝土的道床板,在正负温度梯度作用下,沿道床板横向边缘处温度变化比较大,靠近道床板中部温度变化较小,可见石墨改性材料对道床板横向温度梯度变化趋势没有影响。在正温度梯度时段,普通道床板横向 2、3、6 测点 0~5 cm 范围温度梯度最大值分别为 1.36 °C/cm、1.12 °C/cm、0.94 °C/cm,改性道床板 2、3、6 测点 0~5 cm 范围温度梯度最大值分别为 1.06 °C/cm、0.72 °C/cm、0.5 °C/cm。负温度梯度时段,

普通道床板 2、3、6 测点 0~5 cm 范围温度梯度最大值分别为 -1.2 °C/cm、-1 °C/cm、-0.78 °C/cm,改性道床板的分别为 -1.24 °C/cm、-0.88 °C/cm、-0.64 °C/cm。据此容易引起板边变形的范围在道床板边缘区域,此处横向温度梯度差值较大,正负温度梯度下边缘区域的混凝土更容易承受较大的温度应力,而越靠近道床板中部,温度梯度值较小,表明中部温度分布越均匀,出现较大温度应力的概率较低。根据横向温度分布规律取两道床板边缘区域测点,竖向进一步细化对比分析改性材料对道床板边缘区域混凝土温度分布的影响。

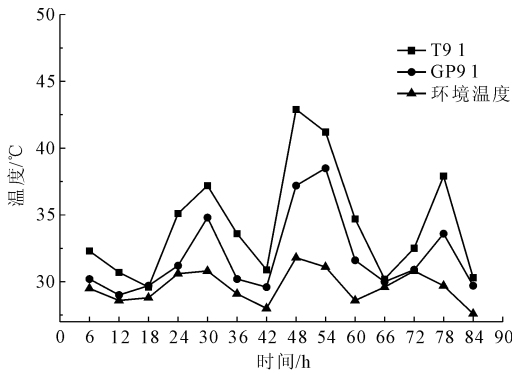
2.2 整体道床边缘部位竖向温度分析

以 9 号测点为例,对道床板边缘部位竖向温度分布细化分析,按照道床板受水泥水化作用强度影响的强弱,分为两阶段分析,第一阶段为凝结硬化初期阶段,在这一阶段由于混凝土凝结硬化过程中产生大量的水化热,道床板的温度受外部环境和水泥水化热的综合影响,呈现出倒 V 型变化趋势;第二阶段为凝结硬化后期到 180 d 这一阶段,在这一阶段内混凝土水化释放的热量很少,整体道床温度的变化主要受外部环境条件的影响。以下对道床板在两阶段的边缘温度进行细化分析。

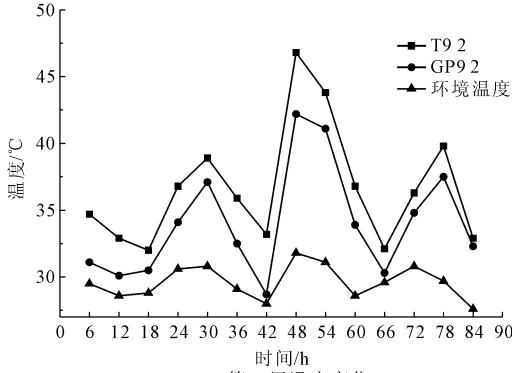
2.2.1 第一阶段温度分析

道床板在凝结硬化初期阶段因水泥水化作用,72 h 之内放热明显,此时道床板温度受控于环境和水泥的水化作用,此期间道床板在一天之内的正负温度梯度没有明显界限,所以试验只取凝结硬化期间的温度进行单独分析,温度数据的采集以 6 h 为间隔;根据混凝土水化热特点,72 h 后水化热影响趋于减小,所以选择浇筑后 84 h 内数据进行分析。9 号测点各层温度的变化见图 3。由图 3 可知,凝结硬化期间,道床板的温度明显表现为倒 V 型趋势,温度表现为先上升后下降。混凝土中加入了碳纤维和石墨粉之后,整体道床各层温度有所降低。与普通混凝土相比,整体道床板边缘部位第 1 层温度最大可降低 13.29%,平均降低了 6.52%,第 2 层最大可降低 13.55%,平均降低了 7.13%,第 3 层最大可降低 11.52%,平均降低了 5.10%,第 4 层最大可降低 8.90%,平均降低了 4.69%。

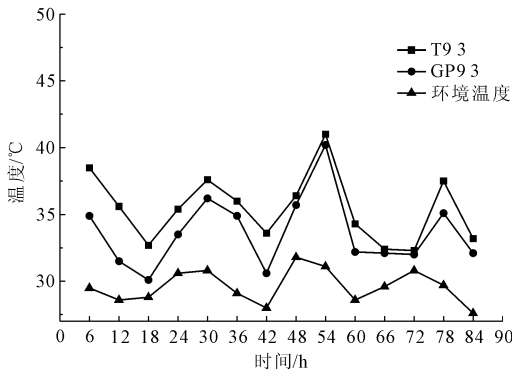
同时,温度降幅最大时刻基本都出现在温度峰值附近,且前两层的降幅最明显。因此,可以得出以下结论:普通混凝土中加入石墨粉与碳纤维改性材料后,通过降低凝结硬化阶段的峰值温度(特别是混凝土中上层的温度),降低了混凝土内部的温度梯度。



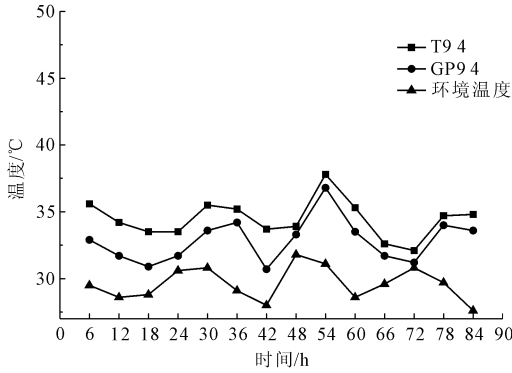
(a) 第一层温度变化



(b) 第二层温度变化



(c) 第三层温度变化



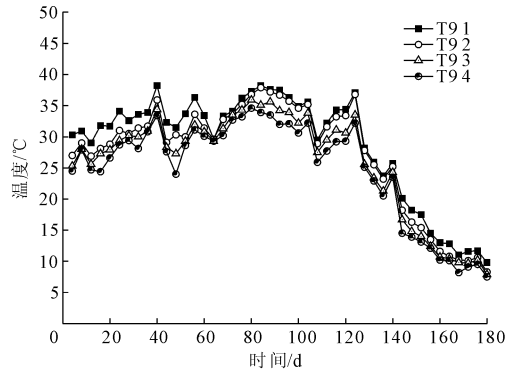
(d) 第四层温度变化

图 3 两种道床板凝结硬化初期各层温度变化

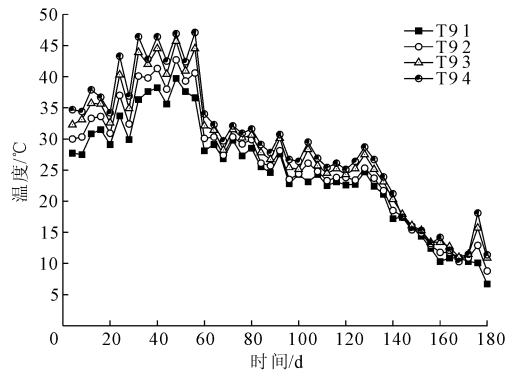
2.2.2 第二阶段温度分析

在对热传导理论及温度总体分布规律研究的基础上,从浇筑后的 4 d~180 d 采集到的温度数据进行分析可知,结合上文可知道床板边缘部位温度梯

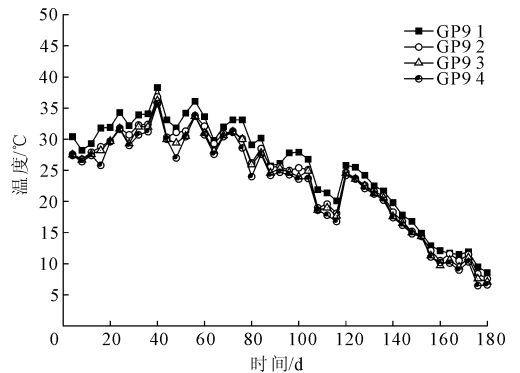
度变化最大,选取道床板边缘位置的测点数据进行分析,取 9 号测点为例。普通混凝土整体道床和改性道床板边缘位置温度分布见图 4。



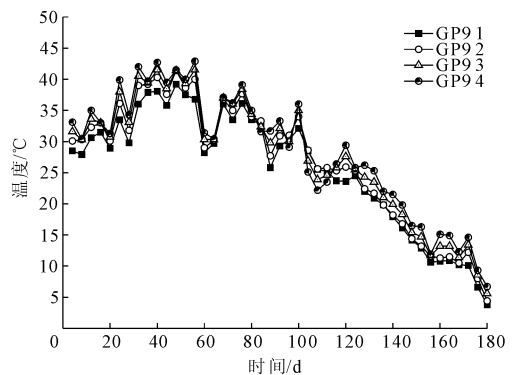
(a) 普通道床板正温度梯度时沿深度方向温度分布



(b) 普通道床板负温度梯度时沿深度方向温度分布



(c) 改性道床板正温度梯度时沿深度方向温度分布



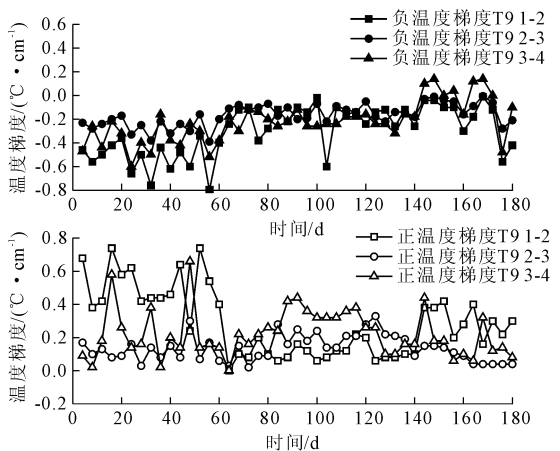
(d) 改性道床板负温度梯度时沿深度方向温度分布

图 4 两种道床板边缘位置温度分布

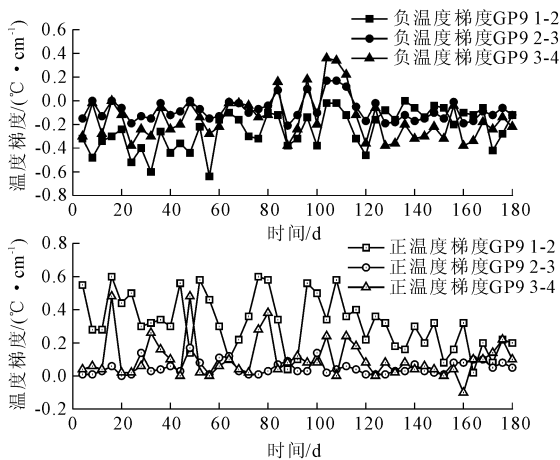
由图 4 可知,随着时间的推移,后期不同层之间的温度差值明显小于前期,即随着时间的推移,温度呈现指数减小的趋势,且在空间域中变化幅度逐渐趋于平缓。两种道床板正温度梯度下沿道床板深度方向温度逐次减小,负温度梯度下沿道床板深度方向逐次增加。从图中也不难发现两种道床板在正负温度梯度下,温度变化趋势也具有 consistency,因此可以得出石墨粉和碳纤维改性材料的加入不会改变道床板温度的变化趋势。再结合图 3,可知正负温度梯度时段温度梯度峰值均出现在混凝土凝结硬化阶段,但正温度梯度时段在夏季温度最高时会出现温度次峰值,且在该时间段内,整体道床 1、2 层温度相比 3、4 层温度波动较大,表明整体道床竖向温度在中上部变化较大。

2.2.3 第二阶段温度梯度分析

通过以上对整体道床边缘部位测点的各层温度梯度分析可知,温度梯度在道床不同深度处变化不同,道床板在 0~5 cm 范围温度梯度曲线变化较剧烈,持续周期较长(如图 5 所示)。



(a) 普通道床边缘位置温度梯度分布规律



(b) 改性道床边缘位置温度梯度分布规律

图 5 两种道床板正负温度梯度对比

这表明正负温度梯度时段温度的变化会对整体道床板边缘部位产生较大影响,整体道床中上部的混凝土更易受影响。分析改性材料对道床板的影响,将图 5(a)和图 5(b)温度梯度的时程曲线进行对比,石墨粉碳纤维改性材料的加入不会改变道床板正负梯度下沿深度方向的变化趋势,但会降低道床板温度梯度值,由图 5(b)可见改性道床板的温度梯度变化幅度更小。对两种道床板正负温度梯度最大值进行提取,如表 2 所示。

表 2 温度梯度最大值统计表

范围/cm	普通道床板温度梯度 /($^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$)		改性道床板温度梯度 /($^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$)	
	负	正	负	正
0~5	-0.80	0.74	-0.64	0.60
5~15	-0.39	0.33	-0.21	0.17
15~20	-0.60	0.66	-0.38	0.48

通过图 5 的对比分析结合表 2 可知,道床板沿深度方向,温度梯度在上层 0~5 cm 范围内变化最大,下层 15 cm~20 cm 范围内次之,5 cm~15 cm 中层范围内变化最小。加入碳纤维和石墨粉改性材料之后,无论在正、负温度梯度下,都有助于减缓整体道床板边缘温度梯度变化趋势,说明石墨粉碳纤维改性材料的加入使道床板边缘区域变化较大的温度梯度趋于平缓。

综上所述,在对混凝土整体道床温度场理论研究基础上,加入改性材料之后的混凝土整体道床与普通混凝土整体道床内部温度分布形式、发展方式相同。通过对比试验可知,改性材料对混凝土整体道床板边缘部位内部温度的均匀性改善作用显著,使道床各层之间温度分布朝着更加合理的发展方向,这将对温度引起的整体道床板边缘混凝土的开裂有极大的改善意义。

3 结论

(1) 通过对本试验中采集的 180 d 的温度数据分析可知,对于普通道床板和加入改性材料的道床板,温度在时间和空间上均呈现出减小的趋势,温度变化幅度由剧烈向平缓过渡。在正负温度梯度下横向道床板在边缘区域温度变化最为明显,竖向整体道床表面向下的 0~5 cm 区域内温度变化最大。

(2) 通过对比两种道床板混凝土凝结硬化初期阶段的温度分布规律可知,添加了石墨粉以后,混凝土整体道床温度变化幅度明显降低,特别是在温度

峰值部位变化最为明显,而且在整体道床的中上层该变化更加显著。

(3) 通过对比两种道床板在凝结硬化后期到 180 天这一阶段的温度分布规律可知,添加石墨粉以后,提高了道床板的导热系数,降低了道床板的温度梯度,从而可以更好的控制整体道床板内由于温度梯度导致的温度应力。

参考文献:

[1] 苏成光. 连续式无砟轨道温度场及开裂特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.

[2] 赵坪锐,向 芬,邓非凡,等. 基于早期温度应力的道床板施工方式[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(10):2082-2090.

[3] 苏成光. 双块式无砟轨道道床板早期温度场特性研究[J]. 铁道工程学报,2019,36(10):33-40.

[4] 潘 飞. 高温储热混凝土的配比优化实验研究[D]. 天津:天津大学,2016.

[5] 王 冲. 地源热泵回填材料优化集成及导热特性研究[D]. 成都:西南科技大学,2014.

[6] 屈春来,薛少欣,辛 悦,等. 石墨对混凝土导热系数及抗压强度影响规律分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(13):243-248.

[7] 杜向琴,刘志龙. 碳纤维对混凝土力学性能的影响研究[J]. 混凝土,2018,40(4):91-94.

[8] 岳彩兰. 碳纤维对混凝土性能的影响[D]. 西安:长安大学,2016.

[9] 雷运波,程 华,张俊鹏,等. 纤维对混凝土早期热膨胀系数的影响[J]. 后勤工程学院学报,2012,28(2):1-5.

[10] 万章博. CRTS I 型双块式无砟轨道温度场特性试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.

[11] Zhu B F. Temperature control and design of joints for RCC arch dams[J]. Dam Engineering, 2003,11(3):205-226.

[12] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社,1999.

[13] Zhu B F, Xu P, Wang S H. Thermal stresses and temperature control of RCC gravity dams[C]//Proceedings of International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Chengdu, China, 1999:65-77.

[14] Mats Emborg, Stig Bernander. Assessment of risk thermal cracking in hardingconcrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1994,120(10):2893-2911.

[15] Banant Z P, Baweja S. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: model B3[J]. Materials and Structures, 1995,28(1):357-365.

[16] Cervera M, Tomás Prato. Thermo - chemo - mechanical model for concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999,125(9):1028-1038.

(上接第 78 页)

[14] 采空区公路设计与施工技术细则:JTG/T D31—03—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.

[15] 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S]. 北京:煤炭工业出版社,2017.

[16] 徐 翔. 某电厂一期工程可行性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017:37-42.

[17] 乔旭俊. 煤矿采空区治理工程设计与施工技术探析[J]. 现代商贸工业,2011,23(15):246-247.

[18] 韩吉坤,侯哲生,顾 洋. 深埋隧道软弱围岩管棚处理效果研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(2):86-91.

[19] 刘维民,李端峰,王桂尧,等. 论采空区对高速公路的影响及处理措施[J]. 公路与汽运,2002(5):20-22.

[20] 陈 盼,谷拴成,张幼振. 浅埋煤层垂向重复采动下地表移动规律实测研究[J]. 煤炭科学技术,2016,44(11):173-177.

[21] 黄健丰,吴 璋,王玉涛,等. 水库下伏采空区覆岩裂隙探查与综合防治技术[J]. 煤矿安全,2020,51(2):90-96.

[22] 陈 凯,陈清通,孙庆先,等. 大同采煤沉陷区光伏示范基地建设采空区注浆治理技术应用[J]. 煤矿安全,2018,49(8):169-172.

[23] 于秋鸽,张华兴,邓伟男,等. 基于关键层理论的地表偏态下沉影响因素分析[J]. 煤炭学报,2018,43(5):1322-1327.

[24] 黄亚德,李文佳,陈 涛,等. 某工程注浆加固对地铁隧道收敛影响的分析[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(3):123-126.

[25] 李树志. 我国采煤沉陷区治理实践与对策分析[J]. 煤炭科学技术,2019,47(1):36-43.

[26] 李斯佳,王金满,万德鹏,等. 采煤沉陷地微地形改造及其应用研究进展[J]. 生态学杂志,2018,37(6):1612-1619.

[27] 公路工程水泥及水泥石灰混凝土试验规程:JTG E30—2005[S]. 北京:人民交通出版社,2005.

[28] 李永红,刘海南,范立民,等. 陕西榆神府生态环境脆弱区地质灾害分布规律[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):116-121.