

张高望,袁捷,张家科,等. 橡胶混凝土道面温度场演化特征[J]. 长安大学学报(自然科学版),2023,43(2):16-25.

ZHANG Gao-wang, YUAN Jie, ZHANG Jia-ke, et al. Variation characteristics of temperature field of rubberized concrete pavement[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2023, 43(2): 16-25.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.02.002

橡胶混凝土道面温度场演化特征

张高望^{1,2}, 袁捷^{1,2}, 张家科^{1,2}, 凌建明^{1,2}, 叶仕江³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海 201804; 3. 陕西省交通规划设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:为了明确橡胶混凝土道面的温度场分布与演化特征,基于光纤光栅测试技术,建立了橡胶混凝土道面现场温度信息的连续监测,研究了橡胶混凝土道面早龄期(0~4 d)和长期(9~84 d)的温度场演化特征,并且以普通混凝土道面为参照,对比分析了橡胶颗粒的加入对混凝土道面长期温度场演化特征的影响。基于温度分布统计,研究了橡胶混凝土道面和普通混凝土道面温度场的频率分布特征。结果表明:在早龄期温度演化的第 1、第 2 阶段,水化放热是影响橡胶混凝土道面温度场的主要因素;在橡胶混凝土道面的零应力温度时刻,道面板中的温度高于板顶和板底,温度梯度为 $-12.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$;在混凝土固化阶段,负温度梯度将导致橡胶混凝土道面产生翘曲固化残余应力。长期监测结果表明橡胶颗粒的加入使混凝土对温度变化的敏感性降低,使混凝土道面在降温阶段的板中温度明显变高;橡胶混凝土道面的最大日平均正温度梯度是普通混凝土的 6.85 倍,而最大负温度梯度只有普通混凝土道面的 51%;在一个温度变化周期(24 h)内,橡胶混凝土道面温度的日变化曲线呈现明显的日不对称性,降温时长是升温时长的 2 倍。温度分布统计结果表明橡胶颗粒的加入可以有效降低混凝土道面出现负温度梯度的频率,特别是对于小于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的温度梯度,橡胶混凝土道面出现的频率比普通混凝土道面低 20.4%,即橡胶颗粒可以有效减少混凝土由于负温度梯度引起的翘曲,有利于大尺寸混凝土道面的建造。

关键词:道路工程;橡胶混凝土;光纤光栅温度传感器;温度场;频率分布

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2023)02-0016-10

Variation characteristics of temperature field of rubberized concrete pavement

ZHANG Gao-wang^{1,2}, YUAN Jie^{1,2}, ZHANG Jia-ke^{1,2}, LING Jian-ming^{1,2}, YE Shi-jiang³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shaanxi Provincial Transport Planning Design and Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: In order to clarify the temperature field distribution and variation characteristics of rubberized concrete pavement, continuous monitoring of temperature information in the field of rubberized concrete pavement was established base on fiber Bragg grating test technology. The

收稿日期:2022-09-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1310600);国家自然科学基金项目(U1933116)

作者简介:张高望(1994-),男,甘肃平凉人,工学博士研究生,E-mail:1910917@tongji.edu.cn.

通讯作者:袁捷(1971-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,E-mail:yuanjie@tongji.edu.cn.

temperature field variation characteristics of rubberized concrete pavement in early age (0 to 4 d) and long term (9 to 84 d) were studied. Ordinary concrete pavement was taken as the control group, the effect of the addition of rubber particles on the long-term temperature field of concrete pavement was analyzed. Based on the temperature distribution statistics, the frequency distribution characteristics of the temperature fields of rubberized concrete pavement and ordinary concrete pavement were investigated. The results show that in the first and second stages of early-age temperature variation, the exothermic hydration is the main factor affecting the temperature of rubberized concrete pavement. At the time of zero-stress temperature of rubberized concrete pavement, the temperature at the middle of pavement slab is higher than those at the top and bottom of the pavement slab, and the temperature gradient of pavement slab is $-12.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$. In the curing stage of the concrete, the negative temperature gradient will lead to warpage and curing residual stress of rubberized concrete pavement. The long-term monitoring results show that the addition of rubber particles reduces the sensitivity of concrete to temperature change, and significantly increases the temperature at the middle of the slab of concrete pavement in the temperature-fall period. The maximum daily average positive temperature gradient of the rubberized concrete pavement is 6.85 times that of the ordinary concrete pavement, while its maximum daily average negative temperature gradient is only 51% that of the ordinary concrete pavement. In a temperature change cycle (24 h), the daily temperature curve of the rubberized concrete pavement shows obvious asymmetry, and the cooling time is twice the heating time. The results of the temperature distribution statistics show that the addition of rubber particles can effectively reduce the frequency of negative temperature gradient in the concrete pavement. Especially for the temperature gradient less than $-10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$, the frequency of rubberized concrete pavement is 20.4% lower than that of ordinary concrete pavement. In other words, rubber particles can effectively reduce the warping of concrete due to negative temperature gradients, which facilitates the construction of large-size concrete pavement. 3 tabs, 13 figs, 29 refs.

Key words: road engineering; rubberized concrete; fiber Bragg grating temperature sensor; temperature field; frequency distribution

0 引言

由于长期大面积暴露于自然环境中,并且受气候条件、太阳辐射等因素的影响,混凝土道面内部的温度分布很不均匀,且变化规律复杂^[1]。在早龄期,水泥水化放热是引起温度变化的重要因素,从而影响着混凝土的变形行为^[2]。温度变形过大会导致混凝土道面的早龄期开裂,并且混凝土道面可以记忆显著的不均匀温度分布,使混凝土道面在硬化阶段形成残余应力和固化翘曲应力,从而影响混凝土道面的长期性能^[3]。在服役期,外界环境温度变化影响道面内部的温度,使道面板产生胀缩变形,但是由于受到基层和周边环境的约束,温度变形将在混凝土道面中产生不同的温度应力,使得道面在收缩时受拉,在膨胀时受压。温度的不均分布将形成温度梯度,容易使道面在板角和板边处形成向上或者向

下的翘曲变形,使道面在板角或板边处失去基层的支撑,形成脱空,然后在交通荷载的耦合作用下,容易导致道面出现断裂、唧泥等病害,影响道面的使用寿命^[4-5]。同时温度变形及其对道面性能的影响也是道面设计和健康监测的重要考量指标之一。

目前,国内外学者对混凝土道面的温度场进行了长期研究。张君等基于水化热、热交换和环境3种因素,通过理论计算、现场监测和数值模拟等方式,深入研究了混凝土路面早龄期温度场的分布与演化特征,建立了普通混凝土路面早龄期温度场的预测模型和模拟程序,为水泥混凝土路面温度场及温度应力的进一步研究提供可靠依据^[6-8]。Kim等研究表明混凝土路面早龄期的温度演化对路面性能有显著的影响,零应力温度是衡量混凝土路面早期性能的非弹性指标,也是评价混凝土路面服役期状态的重要参数^[9-10]。根据路面环境温度、风速、热辐

射等因素的影响,谈至明等建立了不同类型的路面板温度预测模型,并通过实测数据对预测模型进行了验证,研究结果表明预测模型具有良好的普适性^[11-13]。张倩倩等基于实测数据,分别研究了北京、福州、西藏地区混凝土路面板的温度场分布特征,阐述了路面温度场的月变化、日变化规律,分析了当地气象因素对温度场的影响,为当地混凝土路面的设计提供了相应指导^[14-16]。因此,明确混凝土道面的温度场分布与演化特征具有重要意义。

橡胶颗粒具有良好的弹性、韧性、抗震性和阻尼性,将其加入混凝土,用以取代一定体积的骨料,可以形成橡胶混凝土。橡胶颗粒的加入不仅可以解决废旧轮胎的环境污染问题,而且可以有效改善混凝土变形能力差的特点,提高混凝土的韧性、抗冲击性、抗疲劳性、抗冻性和抗渗透性,在寒冷区域具有明显的优势^[17-19]。同时,橡胶颗粒可以吸收混凝土内产生的各种应力,抑制混凝土的收缩变形,阻止或减缓由于微裂纹或收缩变形而引起的道面板开裂,具有修建大尺寸混凝土道面的潜质,进而可以减少道面的接缝数量,提高道面的服务性能^[20]。然而橡胶颗粒的掺入改变了混凝土配合比、骨料成分、微观结构,以及热力学参数,从而影响橡胶混凝土的温度分布。Sukontasukkul 测试了不同橡胶掺量的混凝土热传导系数、热传递速率和热阻率,发现橡胶混凝土比普通混凝土具有更低的导热性,并且随着橡胶掺量的增加,混凝土的热传导系数降低,热传导速率也降低^[21]。Ocholi 等研究发现橡胶颗粒替换体积 25% 矿物集料时,混凝土的热扩散率降低了 65.1%,导热系数降低了 29.4%,热容下降了 29.7%,热渗出率降低了 37.6%,表明橡胶混凝土承受温度变化的能力下降,储热能力增加,与周围环境的热交换速率降低;橡胶混凝土热性能(热传导率、热容、热扩散率、热渗出率)随密度和温度的增大而增大^[22]。Fiore 等研究表明加入体积为 10% 的细橡胶集料,混凝土保温性能可提高 23%^[23]。Chen 等研究表明,影响路面板温度分布的因素不仅包括气候资料,还包括路面材料的热性能参数,而混凝土掺合料的颗粒结构、间隙排列等均会对热性能参数产生较大影响,在用经验公式计算路面能量交换时,建议根据不同材料的热性能参数对其进行标定^[24]。

光纤光栅测试技术可以将道面内部的响应信号转换为光栅折射光波长变化。通过建立道面响应与波长变化之间的关系,可以达到监测道面性能的目的。光纤光栅传感器具有高灵敏、高精度以及优良

的耐腐蚀和耐水性,并且光纤中的光信号不受电磁干扰,是智能监测系统的首选传感器,特别适合在混凝土高水高碱的环境中使用。Zhou 等采用光纤光栅传感器构建了混凝土路面性能的长期监测系统,并且证明传感器具有良好的存活率,表明光纤光栅传感器可以为结构健康评估提供具有前景的解决方案^[25-26]。

综上所述,橡胶混凝土拥有优异的韧性和抗冻等性能,在机场道面中具有良好的应用前景,特别是在寒冷地区机场建设。目前关于橡胶混凝土的研究主要集中于材料特性方面,鲜有关于橡胶混凝土道面温度场的现场研究。因此,深入研究橡胶混凝土道面温度场特性,明确橡胶混凝土道面在早龄期和服役期的温度场分布与演化特征不仅可以明确橡胶颗粒对温度分布的影响,而且可以为橡胶混凝土道面的设计与健康监测提供技术支持。

本文以徐州军用机场迁建工程橡胶混凝土道面扩大应用项目为依托,基于光纤光栅测试技术对橡胶混凝土道面温度场进行了长期监测,分析橡胶混凝土道面早龄期和长期温度场的演化特征,并通过与普通混凝土道面对比,分析了橡胶颗粒对混凝土道面温度场的影响,通过温度频率统计,分析了橡胶温度场频率变化特征,以期对橡胶混凝土道面的设计与建设提供支持。

1 道面结构及温度场监测方案

1.1 道面结构

本研究依托于江苏省徐州市军用机场迁建工程橡胶混凝土道面扩大应用项目,试验段位于跑道北侧平行车道。该试验段位于公路自然区划Ⅱ5区,平均降水量 868.6 mm,年太阳辐射总量 119.4 kcal/cm²,年均气温 13.9℃,最高月均气温 30℃~32.5℃,多年平均最大冻深 10~40 cm,平均地下水位埋深 2~3 m。

试验段道面结构总厚 60 cm,包括 20 cm 混凝土面层、20 cm 水泥稳定碎石基层和 20 cm 灰土垫层。试验段包括 2 种面层,分别为橡胶混凝土和普通混凝土,其配合比如表 1 所示。橡胶混凝土按照橡胶颗粒等体积取代砂的方式制备。橡胶颗粒采用 TRFA-I5075 型橡胶集料,技术参数如表 2 所示。监测采用 NZS-FBG-TM 型光纤光栅温度传感器,其技术参数如表 3 所示。

光纤光栅温度传感器布设于混凝土道面板的中心位置。面层施工前,在测试点位相应的基层上安

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Concrete mix proportions

kg · m⁻³

混凝土类型	水泥	水	橡胶颗粒	砂	不同粒径(mm)碎石的用量			减水剂
					(4.75,9]	(9,19]	(19,26.5]	
橡胶混凝土	405.0	162.0	110.0	358.0	410.0	410.0	546.0	5.7
普通混凝土	405.0	162.0		616.0	410.0	410.0	546.0	4.1

表 2 橡胶颗粒技术参数

Tab. 2 Technical parameters of rubber powder

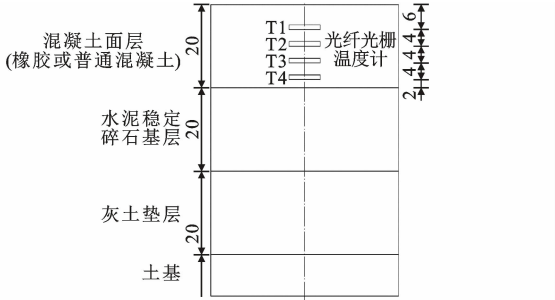
参数	橡胶粉(有机物) 含量/%	无机材料 含量/%	橡胶集料 粒径/mm	接触 角/(°)
参数值	67.21	32.79	0.18~0.55	0

表 3 光纤光栅温度传感器技术参数

Tab. 3 Technical parameters of fiber Bragg grating temperature sensor

参数	量程/ μm	分辨率/ $^{\circ}\text{C}$	光栅中心波长/nm	反射率/%
参数值	-40~200	0.1	1 510~1 590	≥ 90

装钢筋支架,沿水平方向采用绑扎带将温度传感器固定在钢筋支架上,然后进行面层施工,在传感器位置采用人工振捣,以免破坏传感器。为减少施工对传感器的影响,并且保证传感器不影响行驶安全性和道面结构性能,板顶和板底分别预留 6 和 2 cm 安全间距。传感器沿厚度方向依次距面层顶部 6、10、14、18 cm,分别记作 T1、T2、T3、T4,具体如图 1 所示,用于监测混凝土道面板顶、板中、板底的温度分布。



(a) 传感器布设示意



(b) 传感器布设施工

图 1 传感器布设位置

Fig. 1 Schematic of sensors layout

1.2 数据采集与处理方法

数据采集设备采用 NZS-FBG-A02 光纤光栅解调仪,具有无线传输功能。在面层混凝土施工完毕

后,即开始道面温度监测,解调仪采集间隔设定为 10 min。监测从 2020 年 9 月 9 日 12:00~2020 年 12 月 8 日 0:00,共计约 3 个月。同时从国家气象科学数据中心获取当地气温数据。

光纤光栅解调仪获取的数据为波长信息,按照下式将波长信息换算为每根传感器所在位置的温度,从而可以得到混凝土道面早龄期(0~4 d)和长期(9 d 之后)的温度场演化特性,即

$$T=K_T(P_i-P_0)+T_0$$

式中: T 为所测温度; K_T 为温度敏感系数; P_i 为测试波长; P_0 为初始波长; T_0 为传感器固定常数。

2 道面早龄期温度场演化特征

2.1 温度分布演化特征

图 2 为橡胶混凝土道面不同深度的温度分布演化特征:从 2020 年 9 月 9 日 12:00~2020 年 9 月 13 日 12:00。由图 2 可知:以板中温度为标准,橡胶混凝土道面温度演化可分为第 1 阶段,升温阶段(0~5 h),橡胶混凝土道面温度持续上升,板中最高温度比气温高 11.4 $^{\circ}\text{C}$;第 2 阶段,降温阶段(6~44 h),道面温度逐渐降低,这是因为此时水泥水化逐渐减缓,水化热不足以维持混凝土内部温度,但水化放热仍是影响道面温度的主要因素,并且此时道面的板底温度高于板顶;第 3 阶段,周期性温度阶段(45 h 后),橡胶混凝土温度出现和气温相似的规律性波动,这表明在浇筑 45 h 后,气温成为了影响橡胶混凝土道面温度演化的主要因素。

Schindle 等研究表明,混凝土路面早龄期阶段的零应力温度为路面温度峰值 94%时的温度,在该温度时刻之后,由于温度降低路面混凝土内部就会产生拉应力,当其超过混凝土强度时,混凝土将产生早期裂缝^[27-28]。从图 2 还可知,橡胶混凝土的零应力温度为 39.5 $^{\circ}\text{C}$,并且零应力温度时刻为浇筑后 23 h。因此,橡胶混凝土道面的切缝时刻应当在橡胶混凝土浇筑 23 h 后,使橡胶混凝土的强度得到充分发展,从而减少因早切缝产生的缺边掉角等现象。

图 3 给出了橡胶混凝土道面温度在第 1、第 2 阶段内初始时刻(T_0)、最高温度时刻(T_{max})、零应力

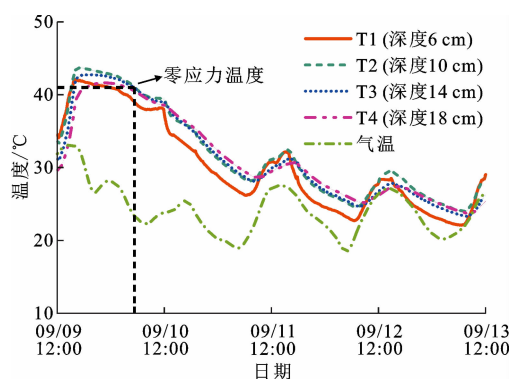


图2 橡胶混凝土道面早龄期温度分布演化特征

Fig. 2 Evolution of temperature distributions of rubberized concrete pavement in early age

温度时刻($T_s=0$)和第1次最低温度时刻(T_{\min})沿板厚方向温度-深度的特征曲线。由图3可知,在橡胶混凝土浇筑完成时,沿厚度方向的温度表现出板顶高而板底低的近线性分布。当混凝土道面温度达到峰值和零应力温度时,由于早龄期水泥水化放热致使热量集中于板中,并且橡胶混凝土的散热较慢,沿厚度方向表现为板中高而板顶和板底低的温度分布现象,并且板顶为临空面,热量散失快,致使板底温度高于板顶。这表明在橡胶混凝土固化阶段,道面板中位置由于热效应导致的膨胀将明显高于板顶和板底。当混凝土道面温度第1次达到最低温度时,沿厚度方向的温度分布表现为板底高而板顶低的现象,而板中和板底温度相近。

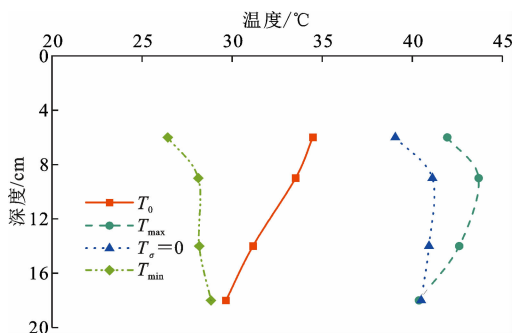


图3 橡胶混凝土道面早龄期不同时刻温度-深度特征曲线

Fig. 3 Relation curves between temperature and depth of rubberized concrete pavement at different moments in early age

2.2 温度梯度演化特征

以T1为道面板顶温度,T4为道面板底温度,计算橡胶混凝土早龄期的温度梯度,其随时间的演化特征如图4所示。由图4可知,0~8 h内,橡胶混凝土道面温度梯度为正。由于早龄期温度梯度受水化热控制,初始温度梯度较高,随着水化进行,温度梯度逐渐减小。9~44 h内,道面温度梯度为负,温度

场演化处于第2阶段,当达到零应力温度时,橡胶混凝土道面板底温度大于板顶,温度梯度为 $-12.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。并且在该时段内,橡胶混凝土发生固化,将在道面中形成负温度梯度下的固化残余应力。45 h之后,橡胶混凝土道面温度梯度出现周期性变化,表明环境温度成了影响道面温度梯度的主要因素,并且起始负温度梯度明显大于正温度梯度,因此该阶段道面容易出现向上的硬化翘曲。

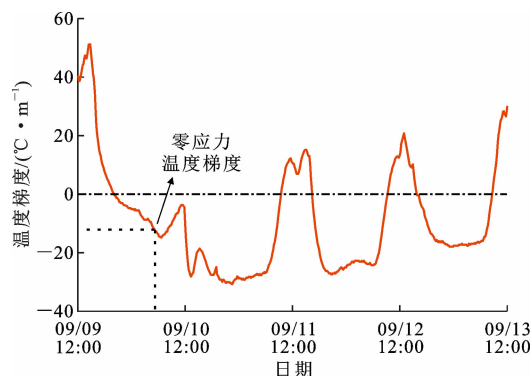


图4 橡胶混凝土道面早龄期温度梯度演化特征

Fig. 4 Evolution of temperature gradients of rubberized concrete pavement in early age

3 道面长期温度场演化特征

为研究橡胶混凝土道面的长期温度场特征,以同时期普通混凝土道面作为对照组进行分析。早期水化热会影响温度场特征,因此,选取2020年9月18日00:00作为长期温度场研究的起点,对比分析橡胶混凝土道面温度场的日变化和分布特征。

3.1 温度场月度变化

图5和图6分别为橡胶混凝土道面与普通混凝土道面板顶和板底日平均温度的月度变化特征。由图5、图6可知,随着气温逐渐降低,混凝土道面板顶和板底的日平均温度也逐渐下降,并且表现出相同的周期性变化。橡胶混凝土道面的板顶日平均气温略高于板底,而普通混凝土道面正好相反,这表明橡胶混凝土道面内多以正温度差为主,而普通混凝土道面内多以负温度差为主。对比橡胶与普通混凝土道面,发现橡胶混凝土道面温度与气温相差更大,即橡胶颗粒的加入会使得混凝土道面温度升高。在大降温阶段,混凝土道面的温度也迅速降低,但橡胶混凝土道面的反应滞后于普通混凝土道面;并且橡胶混凝土道面的板顶和板底日平均温度差小于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而普通混凝土道面板顶和板底的日平均温度则相差可达 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

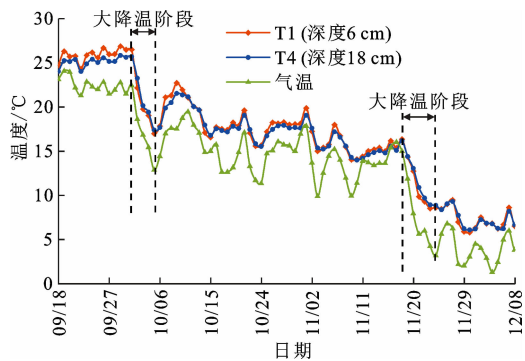


图 5 橡胶混凝土道面日平均温度月度变化特征
Fig. 5 Monthly variations of daily average temperature of rubberized concrete pavement

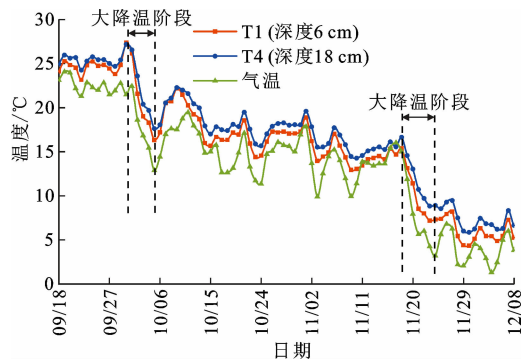


图 6 普通混凝土道面日平均温度月度变化特征
Fig. 6 Monthly variations of daily average temperature of ordinary concrete pavement

图 7 为 2 种混凝土道面日平均温度梯度的月度变化特征。由图 7 可知,混凝土道面的温度梯度也出现周期性变化,在大降温阶段,混凝土道面达到最大负温度梯度。橡胶混凝土道面多以正温度梯度为主,而普通混凝土道面多以负温度梯度为主。橡胶混凝土道面的最大日平均正温度梯度是普通混凝土的 6.85 倍,而最大负温度梯度只有普通混凝土道面的 51%,这是因为橡胶混凝土比普通混凝土更容易吸热。因此,在相同的环境下,橡胶混凝土道面容易受到正温度梯度作用引起的拱胀作用,而由负温度梯度引起的翘曲作用将明显低于普通混凝土,在橡胶混凝土设计与施工中应当着重考虑。此外,负温度梯度大多发生于一个温度周期的低温时段,较小的负温度梯度有助于橡胶混凝土抵抗低温环境下的开裂。

3.2 温度场日变化

在长期监测时段内,以最高温度和最低温度时刻以及温度变化幅度最大时段为例,选取前后共计 48 h 的混凝土道面中的温度监测数据进行研究,其中,高温时段为 2020 年 9 月 30 日 00:00~2020 年

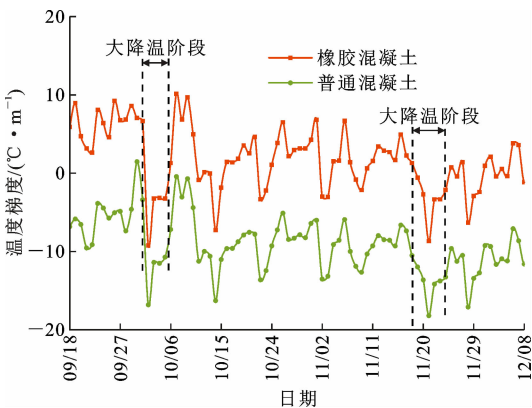


图 7 混凝土道面温度梯度月度变化特征
Fig. 7 Monthly variations of daily average temperature gradient of concrete pavements

10 月 2 日 00:00,低温时段为 2020 年 11 月 29 日 00:00~2020 年 12 月 1 日 00:00,大降温时段为 2020 年 10 月 1 日 12:00~2020 年 10 月 3 日 12:00,具体的温度场分布特征分别如图 8~图 10 所示。

由图 8、图 9 可知:随着气温升高,混凝土道面温度迅速升高,板顶升高最快,随着深度增加,升温出现明显滞后;而随着气温降低,板顶的温度降低也最快,且小幅度的气温波动对道面温度的影响可以忽略。在一个温度变化周期(24 h)内,混凝土道面升温阶段占 1/3,而降温占 2/3,混凝土道面温度的日变化曲线呈现明显的不对称性。在高温时段(图 8),升温阶段橡胶混凝土道面板中和板顶温度相近,道面上部(6~10 cm)升温速率相近,普通混凝土道面板中升温明显慢于板顶;而在降温阶段,橡胶混凝土道面板顶和板底降温速率大于板中,普通混凝土道面板顶和板中大于板底。在低温时段(图 9),降温阶段橡胶混凝土道面板中、板底的降温速率一致,而普通混凝土道面板中降温速率明显大于板底,从而导致橡胶混凝土道面最低温度明显高于普通混凝土道面。此外,橡胶混凝土道面板底的温度波峰滞后于板顶约 2 h,板底温度波谷滞后于板顶约 3 h;而普通混凝土道面板底的温度波峰滞后于板顶约 1.5 h,板底温度波谷滞后于板顶约 2.5 h,这表明橡胶混凝土对温度变化的敏感性低于普通混凝土。

由图 10 可知,在大降温阶段,橡胶混凝土道面各层的降温速率依次为板顶、板底、板中,而普通混凝土道面则依次为板顶、板中、板底。橡胶颗粒的加入导致降温阶段混凝土道面的板中降温速率低于板顶和板底,这是因为橡胶颗粒的加入导致混凝土的热扩散速率降低^[22]。

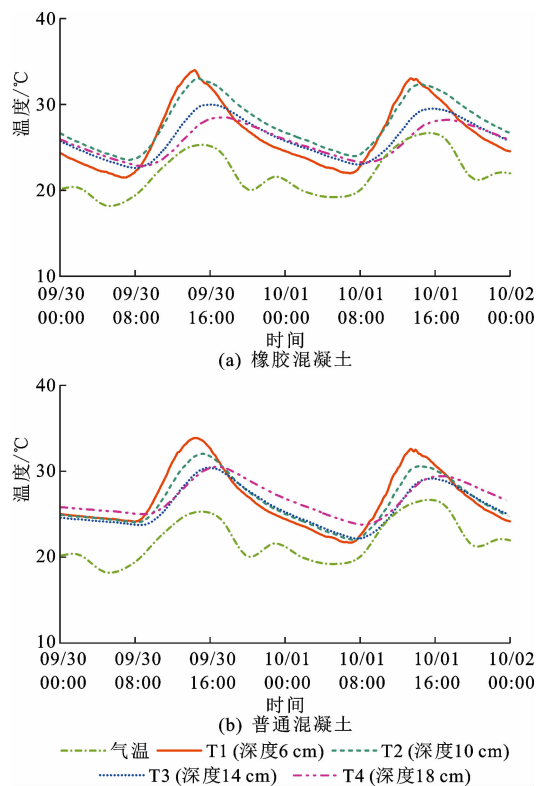


图 8 高温时段混凝土路面温度分布特征

Fig. 8 Temperature distributions of concrete pavement in high temperature periods

3.3 温度场分布特征

在长期监测时段内,选取最高温度 T_{\max} 、最低温度 T_{\min} 和最大温度变化 T_{var} 时刻分别对应的混凝土路面温度信息,进一步分析温度场的分布特征。图 11 为不同时刻混凝土路面温度随深度的分布特征,可知,混凝土路面温度随深度非线性分布。在高温峰值时刻,2 种混凝土路面整体上均表现为板顶高而板底低的正温度梯度状态,相较于普通混凝土路面,橡胶混凝土路面的板顶温度无明显差距,而板底温度较低,板中温度较高,这是因为橡胶混凝土的吸热性较高而导热性较低所致^[22]。在最低温时刻,2 种混凝土路面的温度分布相似,但橡胶混凝土路面温度整体上比普通混凝土路面高 1.5 °C 左右。在大降温时刻,橡胶混凝土路面的板中温度比普通混凝土路面高 2.1 °C,并且橡胶混凝土路面的板中温度高于板顶和板底,使得橡胶混凝土路面的呈现中间高两端低的“纺锤形”分布特征,不同于普通混凝土路面一端高于另一端的“近楔形”分布特征。这是因为橡胶颗粒的加入改变混凝土的热学性能,从而使得混凝土路面的温度场分布发生改变。在降温阶段,板中温度高使得混凝土路面的翘曲变形明显降低,有利于混凝土路面抵抗更为恶劣的温缩和翘曲

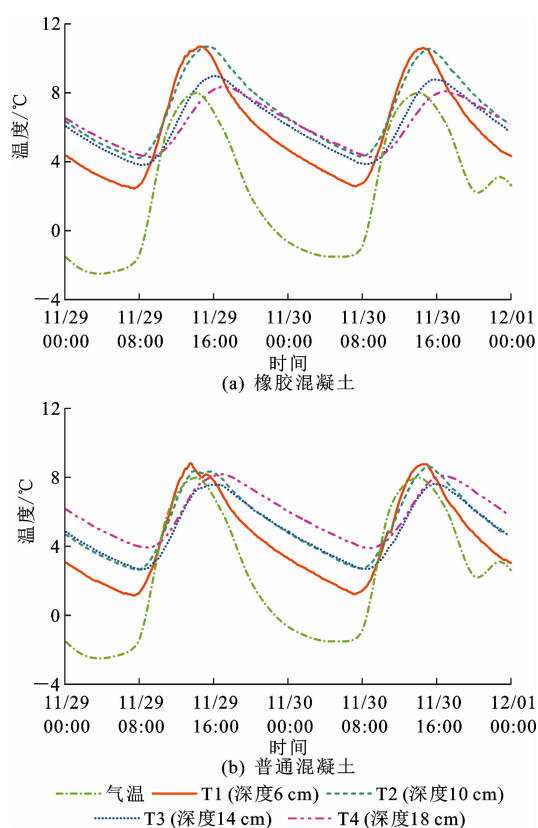


图 9 低温时段混凝土路面温度分布特征

Fig. 9 Temperature distributions of concrete pavement in low temperature periods

耦合作用。

4 路面长期温度场频率分布

为进一步明确 2 种混凝土路面的温度分布特征,将长期监测(2020 年 9 月 18 日 00:00~2020 年 12 月 8 日 00:00)获取的温度数据进行统计分析。首先根据监测的温度范围,将其分为若干区段,每个区段间隔为 2 °C,然后进行气温、路面板顶(T1)、板中(T2)、板底(T4)温度的频数统计,根据得到的各温度区段频数,计算相对频率,即各温度区间分布频次占总统计次数的百分比。频率分布不仅可以明晰混凝土路面的温度场特征,还可与已知温度段内的荷载作用次数耦合,可以评价混凝土路面的耐久性^[16]。

4.1 温度场频率分布

图 12 为混凝土路面不同深度的温度频率分布特征,由图 12 可知,混凝土路面各深度的温度频率分布与气温频率分布相似。混凝土路面板顶和板中的温度分布宽度与气温相近,而板底温度分布宽度比气温小 8 °C,气温对混凝土路面板底温度的影响明显小于板顶和板中;但是橡胶混凝土路面板中的

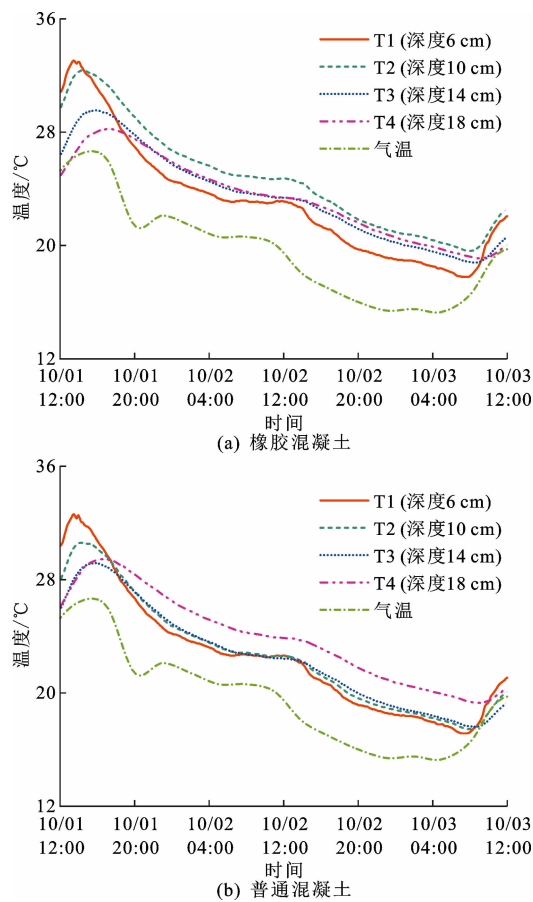


图 10 大降温时段混凝土道面温度分布特征
Fig. 10 Temperature distributions of concrete pavement in large temperature change periods

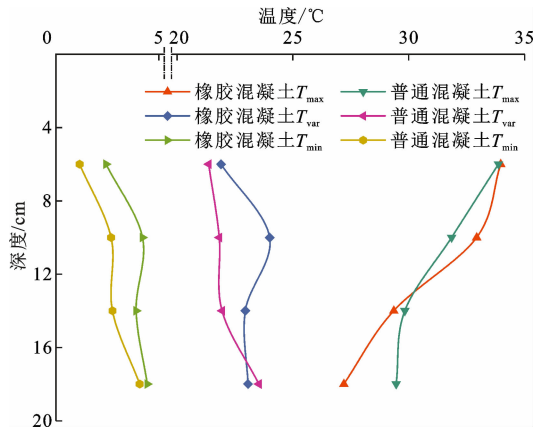


图 11 混凝土道面不同时刻温度-深度特征曲线
Fig. 11 Relation curves between temperature and depth of concrete pavements at different moments

温度分布范围比普通混凝土道面的靠右,表明相同环境下,橡胶混凝土道面板中温度高于普通混凝土道面。橡胶混凝土道面板顶、板中、板底的温度平均值依次为 16.6 °C、17.7 °C、16.4 °C,标准差依次为 6.7 °C、6.5 °C、6.0 °C;而普通混凝土道面板顶、板中、板底的温度平均值依次为 15.6 °C、16.0 °C、

16.7 °C,标准差依次为 6.8 °C、6.3 °C、6.2 °C;气温的平均值是 13.5 °C,标准差是 7.0 °C。同样表明橡胶混凝土道面的板中温度明显高于普通混凝土的。

4.2 温度梯度频率分布

图 13 为混凝土道面温度梯度的频率分布,由图 13 可知,橡胶混凝土与普通混凝土道面具有相似的温度分布特征。橡胶混凝土道面的最高频率温度梯度范围为-10 °C~-8 °C,温度梯度均值为 1.7 °C;而普通混凝土道面的最高频率温度梯度范围为-16 °C~-14 °C,温度梯度均值为-9.1 °C,这表明橡胶混凝土道面的温度梯度明显高于普通混凝土道面。橡胶混凝土道面负温度频率占比 61.2%,普通混凝土道面负温度梯度占比 69.2%。特别当温度梯度小于-10 °C/m 时,橡胶混凝土道面的频率占比为 29.4%,而普通混凝土道面则为 49.8%,可见橡胶颗粒的加入可以有效降低混凝土道面出现负温度梯度的频率,从而有效减少混凝土由于负温度梯度引起的翘曲。在大尺寸混凝土道面建设中,翘曲是影响道面尺寸的一项重要因素^[29],减少翘曲可以有效增大混凝土道面板尺寸。

5 结 语

(1)在早龄期阶段,橡胶混凝土道面板中最高温度比气温高 11.4 °C,橡胶混凝土道面的零应力温度时刻为浇筑后 23 h,道面切缝应当在 23 h 之后。在 0~8 h 内,橡胶混凝土道面温度梯度为正,8~44 h 内,温度梯度为负,当橡胶混凝土固化时,道面将形成负温度梯度下的固化残余应力。

(2)橡胶颗粒的加入使得混凝土道面温度升高,但对温度变化的敏感性降低,导致橡胶混凝土道面的升温与降温反应滞后于普通混凝土道面。混凝土道面温度的日变化曲线呈现明显的不对称性,升温阶段占 1/3,而降温占 2/3。橡胶颗粒的加入使混凝土道面在降温阶段的板中温度明显变高,可显著降低混凝土道面的翘曲变形,这有利于混凝土道面抵抗更为恶劣的降温和翘曲耦合作用。

(3)橡胶颗粒的加入可以有效降低混凝土道面出现负温度梯度的频率,特别是对小于-10 °C/m 的温度梯度,橡胶混凝土道面出现的频率比普通混凝土道面低 20.4%,因此橡胶颗粒的加入可以有效减少混凝土由于负温度梯度引起的翘曲,有利于大尺寸混凝土道面板的建造。

(4)本文仅基于现场实测数据对橡胶混凝土道面的温度场分布特征及演化规律进行了研究,后续

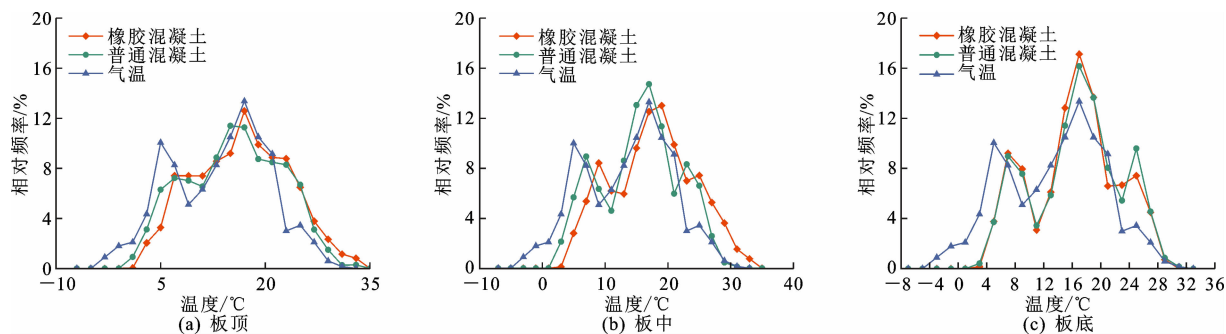


图 12 混凝土道面不同深度温度频率分布

Fig. 12 Temperature frequency distributions of concrete pavement at different depths

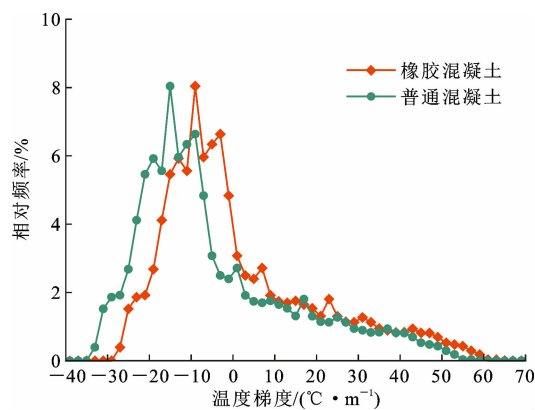


图 13 混凝土道面温度梯度频率分布

Fig. 13 Frequency distributions of temperature gradients in concrete pavement

还需结合数值模拟深入分析混凝土道面的温度场特征,并且通过微细观试验,深入研究橡胶颗粒分布对混凝土道面温度场特征的影响机理。

参考文献:

References:

- [1] QIN Y, ZHANG X, TAN K, et al. A review on the influencing factors of pavement surface temperature [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(45): 67659-67674.
- [2] 郭超, 张玉龙, 赵俭斌, 等. 混凝土水化热对早龄期路面温度场的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(3): 227-231.
GUO Chao, ZHANG Yu-long, ZHAO Jian-bin, et al. Hydration heat effect on early age concrete pavements temperature field [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(3): 227-231.
- [3] 张君, 祁锟, 张明华. 早龄期混凝土路面板非线性温度场下温度应力的计算[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 136-145.
ZHANG Jun, QI Kun, ZHANG Ming-hua. Calculation of the thermal stresses in concrete pavements at early ages [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 136-145.
- [4] 田波, 权磊, 牛开民. 不同基层类型水泥混凝土路面温度翘曲结构试验与理论分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(6): 17-26.
TIAN Bo, QUAN Lei, NIU Kai-min. Structural experiment and theoretical analysis of thermal curling in JPCP with different base types [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(6): 17-26.
- [5] 周玉民, 谈至明, 刘少文, 等. 水泥混凝土路面角隅应力分析[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 105-110.
ZHOU Yu-min, TAN Zhi-ming, LIU Shao-wen, et al. Analysis of near-corner stresses in concrete pavement structure [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(4): 105-110.
- [6] 张君, 祁锟, 侯东伟. 基于绝热温升试验的早龄期混凝土温度场的计算[J]. 工程力学, 2009, 26(8): 155-160.
ZHANG Jun, QI Kun, HOU Dong-wei. Calculation of temperature fields in early age concrete based on adiabatic test [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(8): 155-160.
- [7] 胡昌斌, 金王杰, 孙增华. 水泥混凝土路面早龄期温度场数值模拟研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 175-183.
HU Chang-bin, JIN Wang-jie, SUN Zeng-hua. Numerical simulation of early-age temperature of cement concrete pavement [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 175-183.
- [8] 郭为强, 魏亚. 水泥混凝土路面板硬化过程中温度分布实测与模拟[J]. 公路交通科技, 2015, 32(2): 33-40.
GUO Wei-qiang, WEI Ya. Measurement and simulation of temperature distribution in cement concrete pavement slab during hardening process [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(2): 33-40.
- [9] KIM S M, NAM J H. Measurements and experimental analysis of temperature variations in Portland cement concrete pavement systems [J]. Road Materials and

- Pavement Design, 2010, 11(3): 745-771.
- [10] SOK T, KIM Y K, LEE S W. Numerical approach to predict zero-stress temperature in concrete pavements [J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120076.
- [11] 谈至明, 马正军, 邹晓翎. 基于路表实测温度的路面温度场估计模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 700-704.
TAN Zhi-ming, MA Zheng-jun, ZOU Xiao-ling. Pavement temperature estimation model based on field temperature data [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(5): 700-704.
- [12] WANG D, ROESLER J R. One-dimensional rigid pavement temperature prediction using Laplace transformation [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(9): 1171-1177.
- [13] QIN Y, HILLER J E. Modeling temperature distribution in rigid pavement slabs; Impact of air temperature [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(9): 3753-3761.
- [14] 张倩倩, 田波, 谢晋德. 北京地区水泥混凝土路面温度场研究及气象要素分析[J]. 公路, 2011, 56(7): 44-48.
ZHANG Qian-qian, TIAN Bo, XIE Jin-de. A study on temperature field of cement concrete pavement under meteorology of Beijing area [J]. Highway, 2011, 56(7): 44-48.
- [15] 胡昌斌, 曾惠珍, 阙云. 湿热地区水泥混凝土路面温度场与温度应力研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 727-737.
HU Chang-bin, ZENG Hui-zhen, QUE Yun. Characteristics of concrete pavement temperature field and temperature stress in hot and humid areas [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2011, 39(5): 727-737.
- [16] 权磊, 田波, 牛开民, 等. 青藏高原高等级道路路基路面温度变化特征[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(2): 21-30.
QUAN Lei, TIAN Bo, NIU Kai-min, et al. Temperature variation properties of pavements and subgrades for high-grade roads on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(2): 21-30.
- [17] GUO S, DAI Q, SI R, et al. Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 148: 681-689.
- [18] ROYCHAND R, GRAVINA R J, ZHUGE Y, et al. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117651.
- [19] MUBARAKI M, ABD-ELHADY A, SALLAM H. Mixed mode fracture toughness of recycled tire rubber-filled concrete for airfield rigid pavements [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2013, 6(1): 8-14.
- [20] 朱涵, 焦欣玥, 李建举, 等. 橡胶集料混凝土机场道面板的厚长比分析与计算[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(2): 44-50.
ZHU Han, JIAO Xian-yue, LI Jian-ju, et al. Analysis and calculation of ratio of length to thickness of crumb rubber concrete airport pavement slab [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2019, 32(2): 44-50.
- [21] SUKONTASUKKUL P. Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of precast concrete panel [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 1084-1092.
- [22] OCHOLI A, EJEH S P, YINKA S M. An investigation into the thermal performance of rubber-concrete [J]. Academic Journal of Interdisciplinary Studies, 2014, 3(5): 29-38.
- [23] FIORE A, MARANO G C, MARTI C, et al. On the fresh/hardened properties of cement composites incorporating rubber particles from recycled tires [J]. Advances in Civil Engineering, 2014, 2014: 876158.
- [24] CHEN J, WANG H, XIE P. Pavement temperature prediction; Theoretical models and critical affecting factors [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 158: 113755.
- [25] ZHOU Z, LIU W, HUANG Y, et al. Optical fiber Bragg grating sensor assembly for 3D strain monitoring and its case study in highway pavement [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28: 36-49.
- [26] ZHAO H, WU C, WANG X, et al. Pavement condition monitoring system at Shanghai Pudong International Airport [C]//ASCE. Geo-Shanghai 2014. Reston: ASCE, 2014: 283-295.
- [27] SCHINDLER A K. Concrete hydration, temperature development, and setting at early-ages [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2002.
- [28] HU C B, DU M L, WANG L J. Research of built-in temperature and zero stress temperature of cement concrete pavement at early ages [J]. Advanced Materials Research, 2013, 857: 248-255.
- [29] 黄凯健, 邓敏, 何大贵, 等. 高原地区纤维混杂微膨胀混凝土大尺寸面板[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(4): 474-477.
HUANG Kai-jian, DENG Min, HE Da-gui, et al. Big dimensional pavement slabs with hybrid fiber reinforced micro expansion concrete in plateau [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(4): 474-477.