

基于实测数据的机场水泥道面变温效应分析

赵鸿铎^{1,2}, 马鲁宽^{1,2}

(1. 民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 利用上海浦东国际机场“道面状态监测系统”实测的温度、应变和弯沉, 分析了水泥道面温度以及温度作用下道面翘曲变形、弯沉、接缝传荷能力的变化。结果表明, 土基和基层温度日变化较小, 但季节性变化较大; 道面板温度沿板厚分布呈非线性, 下午时段更显著; 全年正、负温度梯度占比基本相同, 零温度梯度集中在 7:00~10:00 和 19:00~22:00, 且全年呈周期性; 此外, 在横缝(假缝)和纵缝(企口缝)板边中部以及板角, 温度翘曲变形呈同步周期性变化, 板角处最大, 纵缝(企口缝)板边中部最小, 向上(下)翘曲变形的全年最大值均分布在 12 月~1 月(7 月~8 月); 板中最大弯沉基本保持不变, 而板角和横缝(假缝)板边中部最大弯沉日变化和季节性变化显著; 假缝和企口缝的传荷能力随平均温度的增大而增大, 具有良好的二次曲线关系。建议在道面设计和评价中考虑温度作用的影响。

关键词: 水泥道面; 温度; 翘曲变形; 弯沉; 接缝传荷能力
中图分类号: V351.11; U416.2 **文献标志码:** A

Investigation into Effects of Temperature Variations on Airport Cement Pavements Based on Measured Data

ZHAO Hongduo^{1,2}, MA Lukuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Shanghai 201804, China)

Abstract: Using temperature, strain and deflection measured by “Pavement Condition Monitoring System” of Shanghai Pudong International Airport, this study analyzed temperature variation of cement pavements, curling deformation, deflection and load transfer capacity affected by temperature. The results show that daily variation of temperature in the subgrade and base layer is slightly, but seasonal variation is obvious. The temperature distribution along the depth of the slab is nonlinear, and it is more significant in afternoon; the

proportion of positive and negative temperature gradients is basically the same throughout the year, and the zero temperature gradient is cyclical throughout the year, concentrating in the period from 7:00 to 10:00 and 19:00 to 22:00. In addition, under the effects of temperature, for the middle of the dummy joint, the slab corner and the middle of the groove joint, the curling deformation shows a synchronous periodic change within one day, and the curling deformation at the slab corner is the largest while it is the smallest for the longitudinal joint; it also shows that the maximum upward (downward) curling deformation happens between December and January (July and August) throughout the year. The maximum deflection at the slab center remains basically the stable, while the maximum deflection at the slab corner and the middle of the dummy joint exhibit significant daily and seasonal variations; the load transfer capacity of both dummy and groove joints increases with the increasing of the average temperature and they have a good quadratic relationship. It is suggested considering the effects of temperature on design and evaluation of cement pavements.

Key words: cement pavements; temperature; curling deformation; deflection; load transfer capacity

水泥混凝土道面是我国机场铺装的主要结构形式, 其中, 设接缝普通混凝土道面(jointed plain concrete pavements, JPCP)最为常见^[1-2]。暴露在外界环境中, 水泥道面直接受到环境的影响而产生温度变化, 尤以道面板内的温度变化最为剧烈^[3]。水泥混凝土具有显著的热胀冷缩特性, 在板厚方向温度梯度作用下, 道面板产生翘曲变形, 板底与基层接触若出现分离, 便会形成温度翘曲型脱空^[4-5]; 在平均温度变化时, 道面板产生胀缩变形, 接缝缝隙张开程度不同, 影响接缝(特别是不设传力杆的横向缩缝)的传荷能力^[6-7]; 此外, 当道面板翘曲和胀缩变形受

收稿日期: 2018-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(51778477)

第一作者: 赵鸿铎(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为机场与道路铺面的智能化。E-mail: hdzhao@tongji.edu.cn

通信作者: 马鲁宽(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为机场道面评价与管理。E-mail: malukuan5071@163.com

到层间摩阻力、地基反力、板自重和相邻板钳制等约束作用时,便会产生伸缩应力和翘曲应力^[1,8].因而,道面温度变化、温度作用下道面力学响应和结构性能的变化等变温效应与水泥道面设计和评价密切相关.

当前,水泥道面的变温效应研究方法主要有理论分析和实测两种.1927年,Westergaard 基于 Winkler 地基板模型导出了水泥板温度翘曲变形和应力计算的理论公式,奠定了温度翘曲变形和应力计算的基础^[9],自此至今,理论分析经历了从解析求解到数值求解的发展^[1,8,10].理论分析具有广泛的适用性,但理论模型是基于多种假定条件而构建的^[9,11],虽然有限元等数值求解方法使得理论模型的构建趋于结构的实际状况,但理想化的假定条件使得理论分析结果依然具有一定局限性^[9].相对而言,实测方法获得的是足尺试验或者实际道面结构的响应数据,在测试方式准确的前提下,其结果是可靠的.实测结果一方面可用于佐证或修正理论分析值;另一方面,大量实测数据的统计回归可作为结构响应分析的一般模型.早在1920年,美国就建立了 Bates 试验路用于测试路面结构的温度变化和力学响应^[12],此后,又相继建立了 Arlington、Maryland、WASHO、AASHO、Minnesota 等多条试验路^[7],为完善路面结构设计奠定了基础;其中,尤以“LTPP”(long-term pavement performance)计划^[13]最为著名.基于“LTPP”数据,研究者校验了应用较为广泛的高级集成环境模型(EICM)温度预估模型^[14],同时分析了水泥路面板的温度翘曲变形和接缝传荷能

力的变化规律^[6,15].在国内,自1979年以来,研究者也开展了十多条水泥路面的温度测试^[1,16],构建了我国水泥路面温度场预估模型^[1],并提出了公路自然区划最大温度梯度推荐值^[17];此外,田波等^[18]开展了不同基层类型结构下水泥路面温度翘曲足尺试验研究.在机场道面方面,美国联邦航空管理局(FAA)利用国家机场道面测试中心的足尺试验,分析了水泥板翘曲变形和接传荷能力随温度的变化^[19];1992年,FAA 还在丹佛国际机场 34R 跑道道面结构中埋置了温度和应变传感器,用于监测水泥道面温度和应变变化^[7].2014年,上海浦东国际机场建成了国内第一个机场道面状态监测系统(pavement conditions monitoring system, PCMS),用于道面温度、湿度、应变和沉降等性状监测^[20].

本文即利用 PCMS 实测的温度、应变和弯沉数据,重点分析了自然环境中水泥道面的温度变化以及温度作用下道面板翘曲变形、弯沉、接缝传荷能力的变化规律,成果从实测方面进一步揭示了我国机场水泥道面变温效应规律.

1 实测方法

1.1 “道面状态监测系统”

上海浦东国际机场的“道面状态监测系统”位于第四跑道(16L/34R),其架构如图1所示.通过埋置在7个监测断面内的350个传感器和相应系统,“PCMS”实现了道面性能数据的自动采集、传输和存储,并可在服务终端中实时查看道面性能状态^[20].

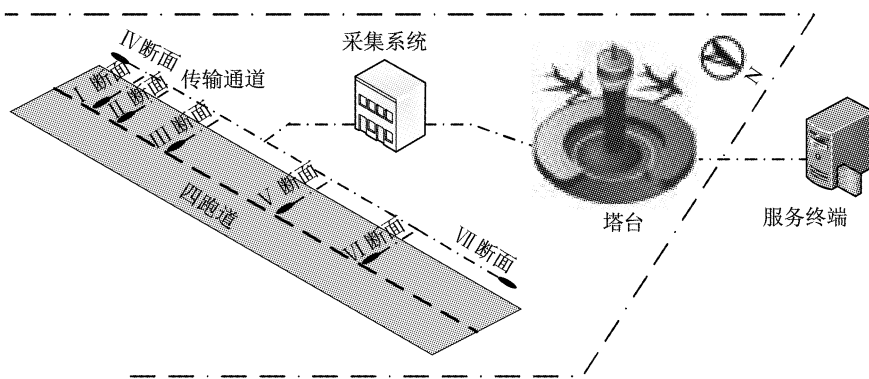


图1 上海浦东国际机场“道面状态监测系统”架构

Fig.1 Framework of "Pavement Condition Monitoring System" for Shanghai Pudong International Airport

1.2 传感器布设和数据收集

断面I的主要目的是监测环境作用下道面的静态响应和飞机起飞荷载作用下道面的动态响应,其传感器的平面布局如图2a所示.为便于表述,对断面I道面板的行和列分别用数字和字母进行编号,

如图2a所示,则2A板为道面静态响应监测位置.

为监测道面静态响应,2A板处的道面中埋置了湿度、温度和应变传感器.其中,温度传感器采用光纤栅温度计(BGK-FBG-4700S),测试误差为 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$,设置在板中和板角;应变传感器采用振弦

式应变计(BGK-4200),测试误差为 $\pm 1.5 \times 10^{-6}$,设置在板中、横缝(假缝)板边中部、纵缝(企口缝)板边中部和板角,如图 2a 所示;同时,每个对应位置纵向布设 9 个温度传感器,布设 2 个应变传感器(位于道

面板顶和板底),具体位置如图 2b 所示,施工如图 2c 所示.为保障数据完整性,温度和静态应变的采样间隔均为 0.5 h.

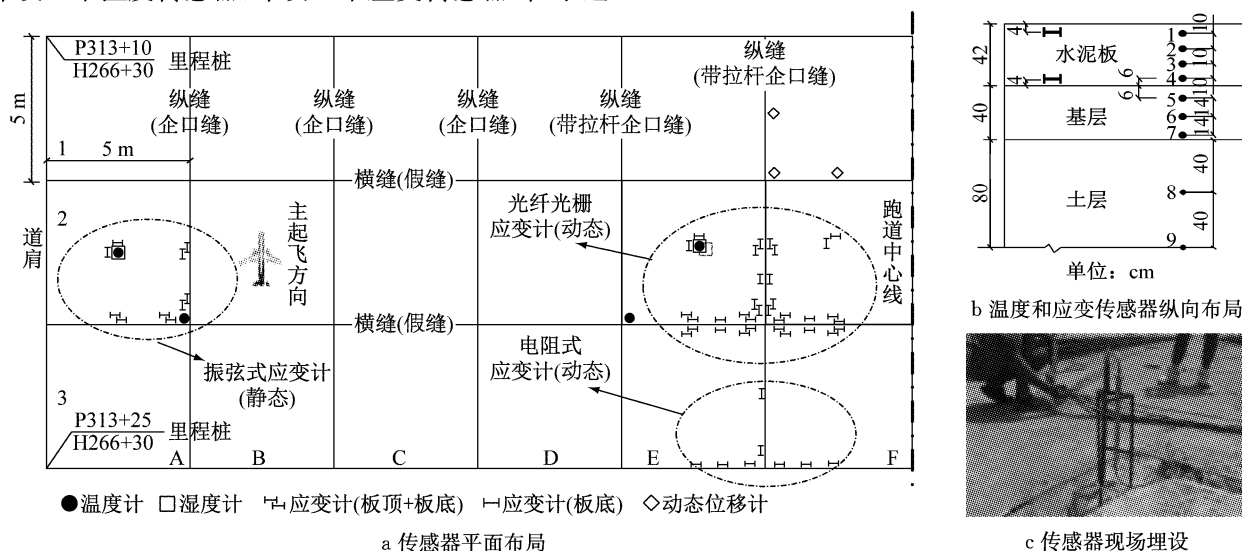


图 2 Layout and installing of sensors for section I

自 2014 年,PCMS 采集并存储了大量道面的温度和静态应变数据,可作为分析基础数据库.

1.3 弯沉测试

本研究采用 Carl Bro 重载落锤式弯沉仪 (heavy weight deflectometer, HWD) 测试 2A 道面板的弯沉,其荷载盘和传感器构型如图 3 所示,弯沉测试误差为 $(3 \pm 2\%) \mu\text{m}$.

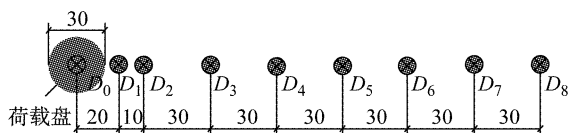


图 3 Carl Bro HWD 荷载盘和传感器构型 (单位: cm)

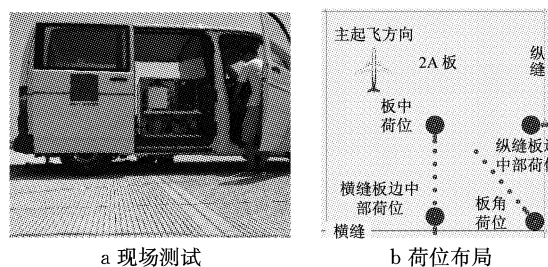
Fig. 3 Configuration of sensors and loading plate of HWD (unit: cm)

现场采用间隔为 1 h 的连续测试,如图 4 所示.测试荷载为 140 kN,同一荷位测试三次,同时记录道面表面温度,取平均值作为最终的代表值;结合机场工作要求和研究需要,最终的测试时间和荷位如表 1 所示;此外,为了避免湿度的影响,所有测试均在晴天状况下开展.

2 结果分析和讨论

2.1 道面温度

选择 2A 道面板处 2014 年全年温度数据对道面



a 现场测试

b 荷位布局

图 4 现场弯沉测试

Fig. 4 In-situ deflection testing

表 1 弯沉测试时间和位置

Tab. 1 Time and location of deflection testing

编号	测试日期	测试时刻	2A 板测试荷位
1	2013/05/24	13:00~16:00	横缝、板中、板角、纵缝
2	2014/05/06	24 h*	横缝、板中、板角
3	2014/08/14	10:00~15:00	横缝、板中、板角、纵缝
4	2015/01/25	11:00~17:00	横缝、板中、板角、纵缝

* 注:从 2014 年 5 月 6 日 10:00 至 5 月 7 日 10:00.

温度开展研究.初步计算表明,板角和板中处温度最大差值为 1.6°C ,在考虑测试误差的基础上,取两位数值处温度数据的平均值作为代表值进行分析.

以 2 h 为间隔,绘制不同季节典型日期的道面温度沿深度的分布状况,如图 5 所示.图 5 表明,道面表面的温度波动最为剧烈,而随着深度增大波动依次减小;1 d 内,土基内部温度基本保持不变,并且基层内的温度变化也较小,但不同季节差异较大;在不同季节,道面板内的温度 1 d 内变化均较为剧烈,沿深度呈现出非线性,白天非线性比夜晚明显,特别

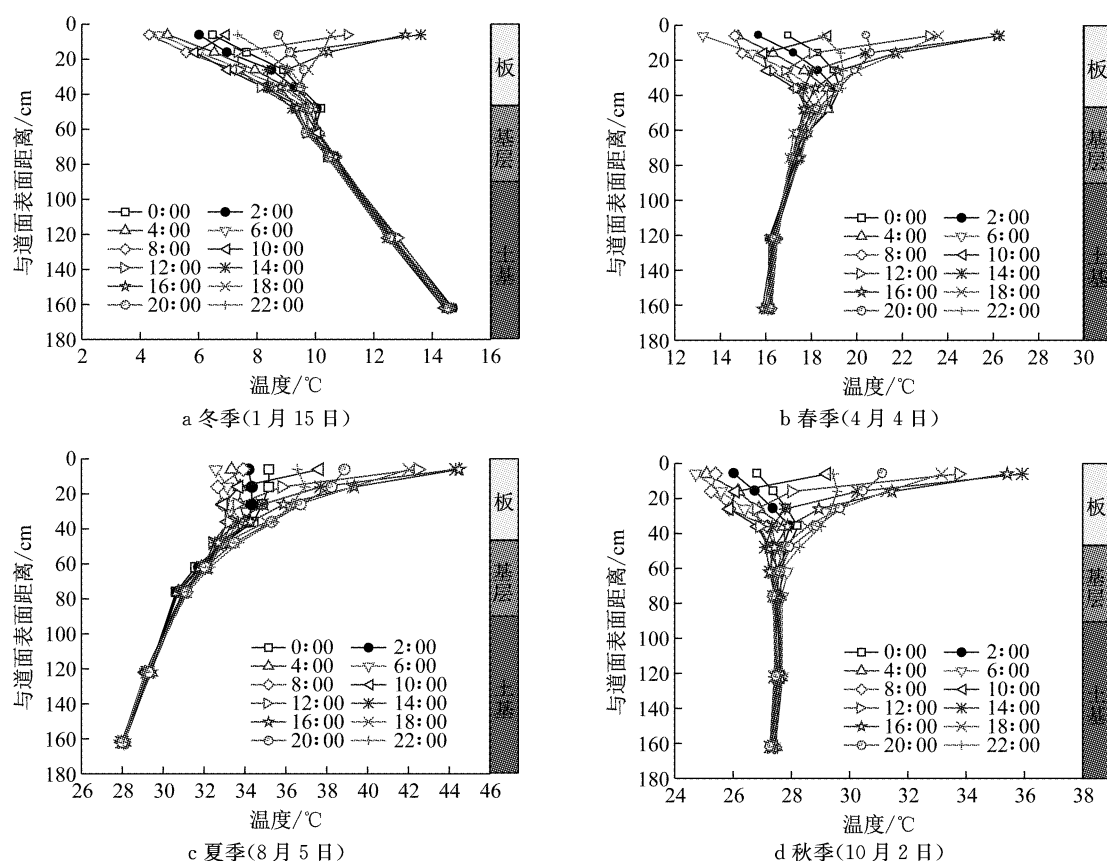


图 5 不同季节典型日期道面温度沿深度分布状况

Fig.5 Temperature profiles on typical dates in different seasons

是下午时段更为显著。

采用等效线性温度梯度^[21]的方法计算道面板内的温度梯度,并统计 2014 年全年的温度梯度频率分布,如图 6 所示。结果表明,测试道面板在一年中温度梯度分布在 -20.55 到 $48.04\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$,与同等厚度的上海地区水泥路面最大温度梯度标准值接近^[1]。由图 6 还可知,道面板全年处于正温度梯度频率为 50.61%,处于负温度梯度频率为 49.39%,二者占比近似相等。此外,对 2014 年全年温度梯度为零的时间进行统计,结果如图 7 所示。图 7 表明,零温度梯度集中在 7:00~10:00 和 19:00~22:00;零温度梯度时间全年呈周期性,从一月份开始,上午零温度梯度出现的时间约为 10:00,随着时间推移,零点出现的时间逐渐提前,在 7 月份达到最低点,约为 7:00,而后再逐渐推迟,在年终达到最高点完成一个循环,同样,下午零温度梯度出现时间由 1 月份的 19:00 逐渐上升到 7 月份的 22:00,而后下降到年终完成循环;相比而言,下午零温度梯度出现的时间分布比上午波动大;这种周期性的变化,导致正温度梯度占全天时间比例夏季最大、冬季最小。

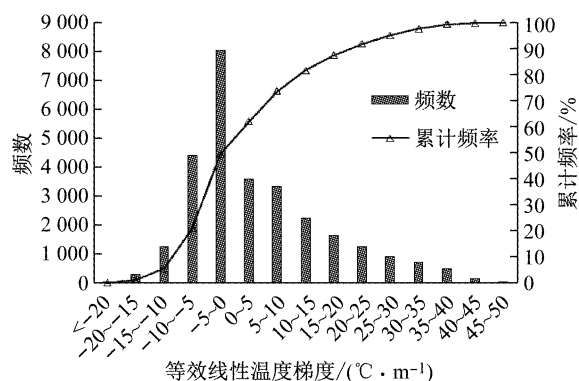


图 6 道面板温度梯度频率分布

Fig.6 Distribution of temperature gradient for slabs

2.2 翘曲变形

温度梯度作用下,道面板顶和板底应变的不一致导致道面板产生翘曲变形。理论上可由板顶和板底应变差来计算道面板沿应变方向的翘曲曲率^[22],如式(1):

$$\rho = -\frac{\epsilon_t - \epsilon_b}{h(1 + \epsilon_t + \epsilon_b)} \quad (1)$$

式中: ρ 为板的曲率(正值表示向上翘曲), m^{-1} ; ϵ_t 、 ϵ_b 分别为板顶和板底应变, 10^{-6} ; h 为板厚,m。

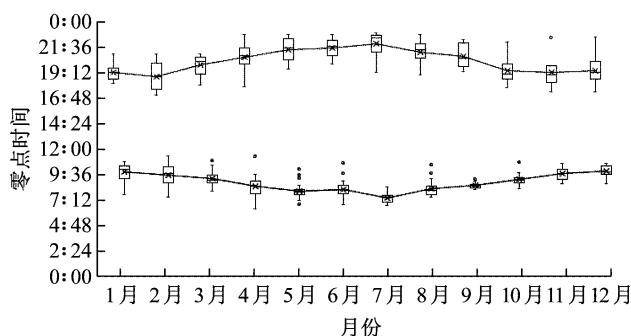


图 7 道面板零温度梯度时间分布

Fig. 7 Distribution of temperature gradient equal to 0 for slabs

埋置在水泥道面板内的应变计测试的是总应变,是温度、湿度、蠕变和外界约束共同作用的结果.为探究温度作用下道面板的翘曲变形,选用 2A 道面板施工三年后(即 2015 年)晴天状况下的应变数据,以避免湿度和蠕变的影响^[23].利用式(1),分别计算横缝(假缝)板边中部(横缝方向)、板角(横缝方向)和纵缝(企口缝)板边中部(纵缝方向)的翘曲曲率,图 8 为部分结果.从中可以发现,道面板全天都会产生翘曲变形,三个位置处翘曲变形均呈现同步周期性;板角处的翘曲变形最大,纵缝(企口缝)板边中部的翘曲变形最小;此外,在三个位置上,向下翘曲变形量均比向上大,因为该季节道面板正温度梯度大于负温度梯.

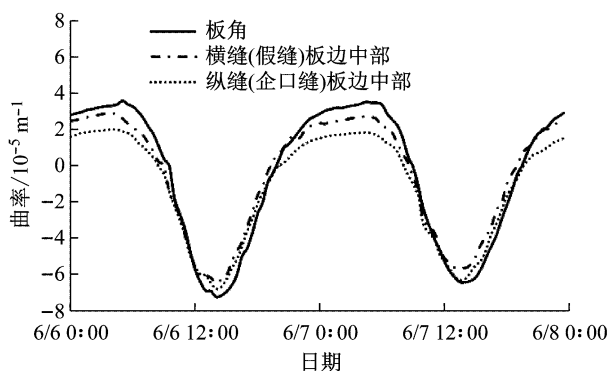


图 8 道面板不同荷位翘曲变形曲率

Fig. 8 Slab curling curvature for different loading locations

板角荷位处全年翘曲变形曲率随温度梯度的变化如图 9 所示.从中可看出,板角荷位处翘曲变形曲率与温度梯度具有良好的线性关系,但温度梯度为 0 时,曲率大于 0,表明此时板角处存在向上的翘曲变形,此变形是混凝土在养生阶段形成的硬化翘曲变形.若假定板翘曲后形成球面^[1],则计算出道面板角向上翘曲的最大值为 $183 \mu\text{m}$ (板长 \times 板宽 $=5 \text{ m} \times 5$

m),这是温度翘曲型脱空产生的根本原因^[4].此外,综合全年翘曲变形曲率来看,横缝(假缝)板边中部(横缝方向)、板角(横缝方向)和纵缝(企口缝)板边中部(纵缝方向)向上翘曲变形的最大值均分布在 12 月~1 月,此时温度和荷载共同作用使得板角拉应力变化最大;向下翘曲变形的最大值均分布在 7 月~8 月,此时温度和荷载共同作用使得板边处于全年最不利受荷状况.

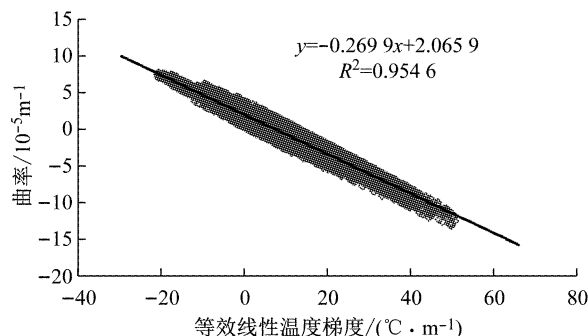


图 9 板角荷位翘曲变形曲率随温度梯度变化

Fig. 9 Variation of curling curvature with equivalent linear temperature gradient for slab corner

2.3 道面弯沉

图 10 展示了 2A 道面板横缝(假缝)板边中部、板中和板角三个荷位处最大弯沉和道面表面温度 24 h 的变化.从中可知,板中最大弯沉变化轻微,1 d 内弯沉的最大差值为 $9 \mu\text{m}$,小于弯沉测试误差($(3 \pm 2\%) \mu\text{m}$),因此可认为测试环境状况下 2A 道面板中最大弯沉不受温度变化的影响;相对而言,横缝(假缝)板边中部和板角最大弯沉受温度变化影响显著,横缝(假缝)板边中部最大弯沉相差 41%,板角最大弯沉相差 52.8%.进一步分析发现,横缝(假缝)板边中部和板角最大弯沉随道面表面温度变化均呈现周期性变化,且可划分为三个阶段:

阶段 I: 5:00~13:00,最大弯沉随道面表面温度增大而减小,呈线性相关性(横缝(假缝)板边中部和板角对应的 R^2 分别为 0.91 和 0.92);

阶段 II: 13:00~16:00,最大弯沉基本保持不变;

阶段 III: 16:00~5:00,最大弯沉随道面表面温度减小而增大,呈线性相关性(横缝(假缝)板边中部和板角对应的 R^2 分别为 0.91 和 0.95).

用加权平均温度和等效线性温度梯度量化道面板温度^[21],图 11 为 24 h 连续弯沉测试当天道面板温度变化结果.由图 11 可知,在白天,道面板受正温度梯度作用,横缝(假缝)板边和板角荷位板底与基

层紧密接触,而此时道面板平均温度较大,造成接缝传荷较大,二者综合作用使得道面横缝板边中部和板角弯沉较小;夜晚则相反。

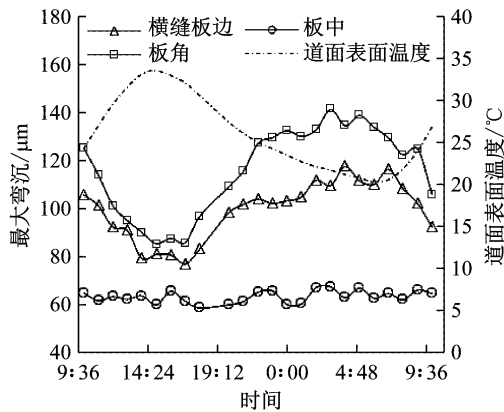


图 10 道面不同荷位最大弯沉和道面表面温度日变化

Fig. 10 Daily variations of maximum deflections and surface temperature

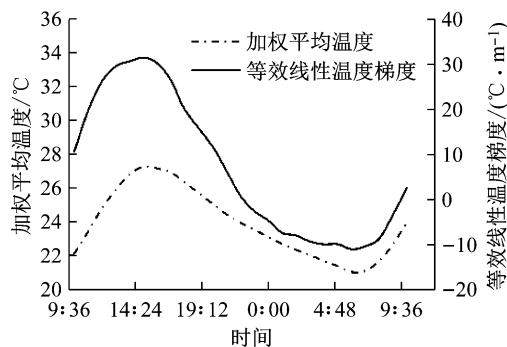


图 11 道面板温度日变化

Fig. 11 Daily variations of temperature in pavement

除了日变化外,图 12 展示了不同季节下午 14:00 的 2A 道面板不同荷位的最大弯沉。从中可知,板中最大弯沉基本保持不变,说明不同季节道基模量的变化并不显著,而其他三个荷位的最大弯沉变化明显,1 月份即冬季最大,5 月份即春季次之,8 月份即夏季最小,这与季节性温度差异密切相关。图 13 展示了不同季节测试当天道面板 14:00 的温度状况,该时刻道面板均受正温度梯度作用,由翘曲变形分析可知,此时道面板在板角和板边与基层接触紧密,因此,此时最大弯沉的变化主要是由平均温度变化引起的接缝传荷能力差异造成的。

2.4 接缝传荷能力

本研究采用挠度比计算的传荷效率 (load transfer efficiency, LTE) 来表征接缝传荷能力^[24]。2A 道面板横缝采用的是我国机场道面普遍采用的假缝,图 14 展示了其传荷效率 1 d 内的变化趋势。从中可知,接缝传荷能力无显著连续变化规律,但白天

传荷能力总体偏大,平均值 (8:00~18:00) 为 93.90%,夜晚总体偏小,平均值 (23:00~7:00) 为 85.21%,下降了近 8.69%。出现上述现象的原因是,假缝的传荷是通过接缝间的集料嵌锁和基层支撑作用实现的,在白天,道面板在正温度梯度作用下板边和板角与基层接触紧密,并且此时道面板温度较高,接缝的缝隙小,集料嵌锁作用大,因此传荷能力偏高,而夜晚则相反。

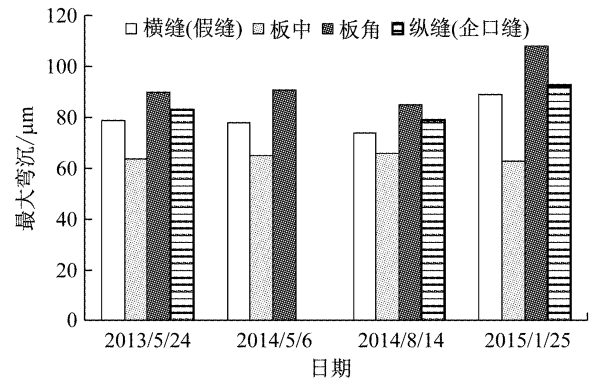


图 12 道面不同荷位在不同季节最大弯沉 (14:00 测试)

Fig. 12 Maximum deflection for different loading locations in different seasons (measured at 14:00)

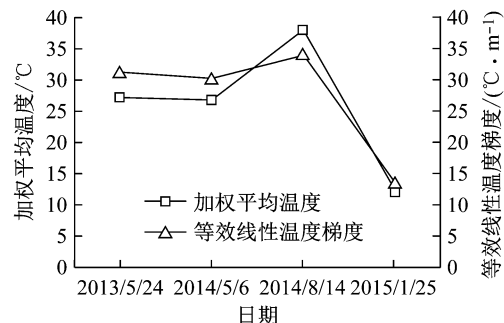


图 13 道面板不同季节温度变化 (14:00 测试)

Fig. 13 Seasonal variations of pavement temperature (14:00)

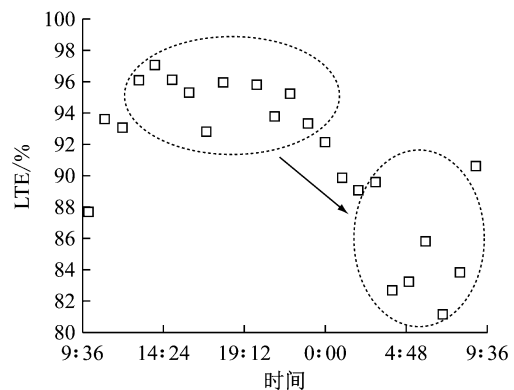


图 14 道面横缝(假缝)接缝传荷能力日变化

Fig. 14 Daily variations of LTE for dummy joint

为进一步分析道面板接缝传荷能力随温度的变化规律,选用 2A 道面板在不同季节下午时段(12:00~18:00)受正温度梯度作用时测试的弯沉来计算 LTE,以保证基层具有良好的支撑状况,同时计算对应时间的道面板加权平均温度,绘制二者散点图,并作相关性分析,结果如图 15 所示.从图 15 可以看出,横缝(假缝)和纵缝(企口缝)传荷能力均随平均温度的增大而增大,且呈现出良好的二次曲线关系.但当接缝设置传力杆时,相关研究表明^[7,25]其传荷能力基本不受平均温度的影响.

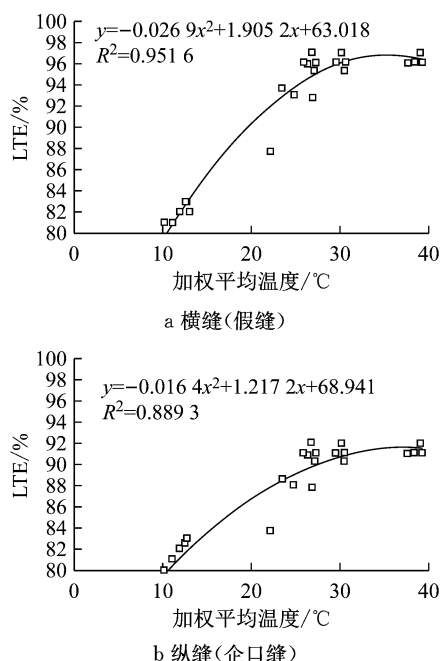


图 15 道面板接缝传荷能力随平均温度的变化
Fig.15 LTE varying with average temperature

3 建议

分析表明,在自然环境中,水泥道面板内的温度具有周期性变化和沿厚度非线性分布的特点,在此温度作用下,道面板会出现反复的翘曲和胀缩变形.因此,道面板的变温效应,一方面使得道面板呈现“非平板”的状态,另一方面也改变了道面板底基层的支撑状况和接缝的传荷能力.

因此,在道面板的应力分析中需要考虑温度和荷载的耦合作用;同时,我国机场水泥道面设计时采用接缝传荷的应力折减系数一般取值 0.25^[26],而不同温度状况下,接缝的传荷能力是不断变化的,需要进一步探究温度作用下接缝传荷能力的变化规律,并建立与应力折减系数的关系,最终按照我国不同季节和不同地域给出应力折减系数的推荐值,为精

细化设计服务;另外,我国机场道面板底脱空和接缝传荷能力评价^[24]以弯沉为基础,因而需要考虑温度对水泥道面弯沉的影响,参照本研究的成果,在白天时段开展弯沉测试可避免温度的影响,但机场停航一般在夜间时段,此方式与现实中机场正常运行时间相悖,因此后续还应开展弯沉的温度修正研究,以保证评价结果的可靠性.

4 总结

(1) 1 d 内,土基和基层内部温度日变化较小,但季节性差异较大;道面板内的温度 1 d 内变化较为剧烈,沿深度分布呈现出非线性,且白天比夜晚明显,特别是下午时段更显著;道面板全年正、负温度梯度占比基本相同,零温度梯度集中在 7:00~10:00 和 19:00~22:00,且全年呈周期性.

(2) 温度作用下,横缝(假缝)板边中部、板角和纵缝(企口缝)板边中部翘曲变形呈现同步周期性变化,板角翘曲变形最大,而纵缝(企口缝)板边中部最小;在三个荷位处,全年向上的翘曲变形最大值均分布在 12 月~1 月,全年向下的翘曲变形最大值均分布在 7 月~8 月.

(3) 温度作用下,板中最大弯沉基本保持不变,而板角和横缝(假缝)板边中部最大弯沉呈现显著日变化和季节性变化,且日变化具有周期性.

(4) 温度作用下,假缝的传荷能力白天总体偏大,夜晚总体偏小;假缝和企口缝的传荷能力随平均温度的增大而增大,二者呈现出良好的二次曲线关系.

(5) 建议在水泥道面设计中考虑温度和荷载的耦合作用以及接缝传荷能力的变化;同时,在水泥道面板底脱空和接缝传荷能力评价中考虑温度对道面弯沉的影响,以提高评价准确性.

本研究基于上海浦东国际机场水泥道面监测数据,后续还应增加不同道面结构和不同气候状况下道面变温效应数据的监测,以完善水泥道面变温效应研究.

参考文献:

- [1] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计理论和方法[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
YAO Zukuang. Design theory and procedure of cement concrete pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [2] 谈至明, 赵鸿铎, 张兰芳. 机场规划与设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2010.

- TAN Zhiming, ZHAO Hongduo, ZHANG Lanfang. Planning and design of airports [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [3] 景天然, 严作人. 水泥混凝土路面温度状况的研究[J]. 同济大学学报, 1980(3): 88.
- JING Tianran, YAN Zuoren. Investigation on the temperature conditions of cement concrete pavements [J]. Journal of Tongji University, 1980(3): 88.
- [4] 赵军. 刚性路面板底脱空检测评定的理论与方法[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- ZHAO Jun. Theory and method for detection and evaluation of void beneath rigid pavement slab [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [5] VANDENBOSSCHE J M. Effects of slab temperature profiles on use of falling weight deflectometer data to monitor joint performance and detect voids [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2005(1): 75.
- [6] KHAZANOVICH L, GOTLIF A. Evaluation of joint and crack load transfer final report [R]. Champaign, IL: ERES Consultants, 2003.
- [7] RUFINO D, ROESLER J, BARENBERG E. Mechanistic analysis of pavement responses from Denver International Airport [R]. Urbana-Champaign, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004.
- [8] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- HUANG Yangxian. Pavement analysis and design [M]. Beijing: China Communications Press, 1994.
- [9] IOANNIDES A M. Concrete pavement analysis: the first eighty years [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2006, 7(4): 233.
- [10] AL-GHAFRIL I H, JAVID M A. Comparative analysis of rigid pavement using Westergaard method and computer program [J]. Journal of Soft Computing in Civil Engineering, 2018, 2(2): 19.
- [11] WAND D, ROESLER J R, GUO D Z. Analytical approach to predicting temperature fields in multilayered pavement systems [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(4): 334.
- [12] SEELY B E. The scientific mystique in engineering: highway research at the bureau of public roads, 1918 ~ 1940 [J]. Technology and Culture, 1984, 25(4): 798.
- [13] GONG H, SUN Y, HU W, *et al.* Investigating impacts of asphalt mixture properties on pavement performance using LTPP data through random forests [J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 203.
- [14] LARSON G, DEMPSEY B J. Enhanced Integrated Climatic Model Version 2.0 [R]. Champaign, IL: Department of Civil and Environmental Engineering, 1997.
- [15] ALI H, LOPEZ A. Statistical analyses of temperature and moisture effects on pavement structural properties based on seasonal monitoring data [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1996, 1540(1): 48.
- [16] 邹晓翎, 谈至明, 钱晨. 路面结构层温度特征值的估计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(7): 1041.
- ZOU Xiaoling, TAN Zhiming, QIAN Chen. Estimation of characteristic temperatures in pavement structure [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(7): 1041.
- [17] 谢国忠, 袁宏, 姚祖康. 水泥混凝土路面最大温度梯度值[J]. 华东公路, 1982.
- XIE Guozhong, YUAN Hong, YAO Zukang. Maximum temperature gradient of cement concrete pavement [J]. East Road, 1982.
- [18] 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.
- TIAN Bo, QUAN Lei, NIU Kaimin. 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.
- [19] GUO E H, MARSEY W. Verification of curling in PCC slabs at the national airport pavement test facility [J]. American Society of Civil Engineers, 2001, 6(1): 78.
- [20] ZHAO Hongduo, WU Can, WANG Xiaohong, *et al.* Pavement condition monitoring system at Shanghai Pudong International Airport [C] // Geotechnical Special Publication. Reston: ASCE, 2014: 283-295.
- [21] JANSSEN D J, SNYDER M B. Temperature-moment concept for evaluating pavement temperature data [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2000, 6(2): 81.
- [22] RANIA E A, VANDENBOSSCHE J M. Effects of temperature and moisture gradients on slab deformation for JPCPs [J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(8): 563.
- [23] JEONG J, ZOLLINGER D G. Environmental effects on the behavior of jointed plain concrete pavements [J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(2): 140.
- [24] 中国民用航空局. 民用机场道面评价管理技术规范: MH/T5024—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- CAAC. Technical specifications of aerodrome pavement evaluation and management: MH/T5024—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [25] KOHN S D, GEMAYEL C A, TAYABJI S. Joint load transfer in concrete airfield pavements: final report [R]. Rosemont, IL: Innovative Pavement Research Foundation, 2011.
- [26] 中国民用航空局. 民用机场水泥混凝土道面设计规范: MH/T5004—2010 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- CAAC. Specifications for airport cement concrete pavement design: MH/T5004—2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2010.