

温度-荷载作用下新旧混凝土道面板缝力学性能

邓友生^{1,3}, 姚志刚^{1,3}, 邓明科², 李明⁴, 李龙^{1,3}, 肇慧玲^{1,3}

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 西安科技大学 桩承结构研究中心, 陕西 西安 710054; 4. 上海华东民航机场建设监理有限公司, 上海 200050)

摘要: 为研究新旧混凝土道面板缝处温度-荷载对机场道面板间力学性能的影响, 基于 Winkler 地基模型, 采用有限元方法建立了道面结构温度场计算模型。同时对华东地区某机场道面进行了重型落锤式弯沉测试, 通过对比分析新旧道面板上不同位置处的弯沉、脱空判定值及传荷系数的变化规律, 验证了计算模型的可靠性, 进一步分析板底拉应力作用机理。结果表明: 现场测试弯沉值考虑温度的影响, 以保证对新旧道面板的板底脱空判定值和接缝传荷能力评价结果的可靠性; 新旧道面间接缝的传荷系数与温度呈较好的二次曲线关系; 随温度升高, 在荷载作用下板底集中应力无法有效地释放, 新道面的板底拉应力明显增大; 提高道面板弹性模量可增强接缝处新旧道面板间应力扩散传递, 但也会增大板底拉应力, 易导致道面板沿板底向板顶开裂破坏。

关键词: 水泥混凝土路面; 温度场; 弯沉值; 接缝传荷; 板底拉应力

中图分类号: TU279.7⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)06-0899-07

Mechanical properties of joints between new and old concrete pavement under temperature-load

DENG Yousheng^{1,3}, YAO Zhigang^{1,3}, DENG Mingke², LI Ming⁴, LI Long^{1,3}, ZHAO Huiling^{1,3}

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China ;

3. Plie-supported Structures Research & Test Center, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

4. Shanghai East China Civil Aviation Airport Construction Project Management Co., Ltd., Shanghai 200050, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of the joints between new and old concrete pavement slabs under temperature-load action, based on the Winkler foundation model, the temperature field calculation model of pavement structure was established by finite element method. At the same time, heavy drop weight deflection test was carried out on pavement of an airport in East China, the changes of deflection, void judgment value and load transfer coefficient at different positions between the old and new pavement slabs were compared and analyzed, which verified the reliability of the calculation model and further analyzed the mechanical mechanism of slab bottom tensile stress. The results showed that the influence of temperature should be taken into account when calculating the deflection value in field test. So as to ensure the reliability of the evaluation results of void judgment value and joint load transfer capacity of the old and new pavement slabs; The load transfer coefficient of the joints between the old and new pavement had a good quadratic curve relationship with the temperature; With the increase of temperature, the concentrated stress at the bottom of the slab could not be effectively released under the load, and the tensile stress at the bottom of the slab increased significantly; The stress diffusion can be enhanced at the joints by increasing the elastic modulus of the pavement slab, but it could also increase the tensile stress at the bottom of the slab, which was easy to cause the cracking failure of the slab from the bottom to top of the slab.

Key words: cement concrete pavement; temperature field; deflection value; joints load transfer; slab bottom tensile stress

收稿日期: 2022-01-03

修改稿日期: 2022-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878554, 41672308); 陕西省自然科学基金研究计划重点项目(2018JZ5012)

第一作者: 邓友生(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事基础工程及结构抗震防灾与减灾方向的研究, E-mail: dengys2009@126.com

通信作者: 姚志刚(1989—), 男, 博士生, 工程师, 主要从事基础工程及结构抗震防灾与减灾方向的研究, E-mail: yaozg0501@126.com

近年来,我国民航运输持续高速发展,为适应航空交通量快速增长的需求,各地的机场不断地进行机坪道面扩建.不同时期投入使用的新旧水泥混凝土道面必然产生接缝,严重地削弱了道面的整体性,接缝位置作为道面结构受荷最为薄弱的部位,对接缝处及两侧道面板的性能评价已成为该研究领域的关键问题.已有研究表明道面结构不仅承受交通荷载,而且受自然环境下的温度影响也不容忽视.道面结构内部出现较大的温度梯度,但受自重及临近道面板约束的影响,板内将产生温度应力,导致板内裂缝的产生与扩展^[1-3].目前,一些国内外学者针对温度梯度引起板内温度应力开展了较多研究.如 Hansen 等^[4-6]研究了道面板表面不同温度条件下温度沿板厚度方向的分布差异,通过有限元法反演计算板内不同深度处的温度梯度,并分析道面板板角发生翘曲变形的条件.基于试验数据,田波等^[7-9]认为板内温度受环境温度影响显著,温度沿板厚度方向呈非线性分布,通过长期监测认为板内正、负温度梯度的交替持续时间有明显变化,板内温度-应变增量日间变化规律具有明显的滞回特性.陈双等^[10]认为飞机尾喷口温度与温度场最大温度和道面板温度应力呈线性关系,建立了道面结构在飞机尾喷疲劳作用下的寿命预测模型.戚春香等^[11-13]采用数值模拟手段探讨分析温度和荷载作用下地基反应模量、面板尺寸及弹性模量等因素对道面板内应力的影响.

针对温度引起道面板翘曲变形研究方面,美国联邦航空管理局通过足尺试验,分析了道面板翘曲变形和接传荷能力随温度变化的原因^[14].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,赵鸿铎等^[15]利用该系统长期实测的温度、应变和弯沉数据,认为板间横缝、纵缝、板边中部及板角的温度翘曲变形具有同步周期性变化特点.刘海伦等^[16-17]现场测试认为板中处的弯沉几乎不受路表温度变化影响,板边弯沉、板角弯沉、脱空判定值受路表温度变化影响显著,另外假缝类道面接缝传荷能力受温度影响显著.

综上,有关道面结构仅受温度场作用的试验研究较多,但在温度-荷载作用下道面结构相关的力学特性研究较少.另外,由于考虑协调飞机开展现场试验的难度极大和巨大造价等因素,目前的研究成果多是基于有限元方法,实测数据尤为匮乏,尤其关于新旧道面接缝处的研究文献更少.

我国幅员辽阔,地区间的气候差异显著,本文结合地区气候和道面特点,对华东地区某机场进行新旧道面接缝处现场测试,并建立数值模拟,对比分析了温度-荷载作用下道面板翘曲变形、接缝传荷能力等变化规律,进一步揭示了板内受力特性,为类似地区的有关研究提供借鉴.

1 现场试验

1.1 试验概况

华东地区某机场飞行区等级为4E,机坪扩建工程于2019年3月开工建设,设计机位类别为C类,扩建面积约9.0万m².道面结构设计自上而下为40cm厚水泥混凝土面层、40cm厚水泥稳定碎石基层、50cm厚山皮石垫层,场区单块水泥混凝土道面板尺寸为5.0m×5.0m×0.4m.试验段位于机场控制区内新旧道面交界处,接缝长度约180m,如图1.沿接缝处两侧各有新旧水泥混凝土道面板,旧水泥混凝土道面于2007年9月投入使用,现场测试以接缝处两侧的道面板作为研究对象.

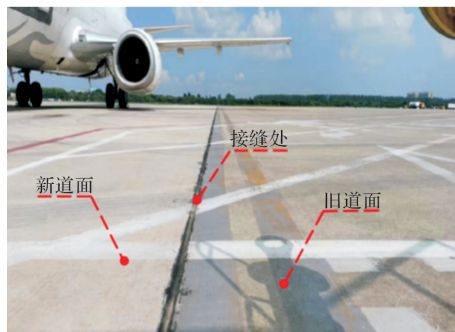


图1 新旧水泥混凝土道面接缝处

Fig. 1 The joints between new and old cement concrete pavement

1.2 测试设备

结合测试场地实际条件,现场测试设备采用落锤式弯沉仪(FWD),通过改变锤重和提升高度控制荷载的大小,由半径为0.15m的刚性承载板作用在道面上.道面上的弯沉值可由弯沉仪设备上的8个传感器测定,每个测点测速约40s,分辨率为1μm.

1.3 测试点布置

试验测试点分别位于2#(新道面)和5#(旧道面)板的板中、板边和板角,其中板中测点位于道面板面的几何中心,板边测试点位于距板边垂直距离0.15m的板边中点处,板角测试点位于与邻边相互垂直距离均为15cm处,传感器间距0.3m,

测试点布置如图 2。测试点在 2# 板和 5# 板分别有 3 处, 每个测试点测试 3 次。由文献[1, 18]可知正温度梯度下对道面结构的弯沉变形更不利, 参照文献[16, 19]已对一天内正负温度梯度的区段进行划分, 故本文仅测试正温度梯度作用下道面板的弯沉变形。

试验在 2019 年 8 月 3—8 日白天进行现场弯沉测试, 每间隔 30 min 测试一次, 分别取 15 ℃、30 ℃、45 ℃、60 ℃ 条件下弯沉值作为研究内容。

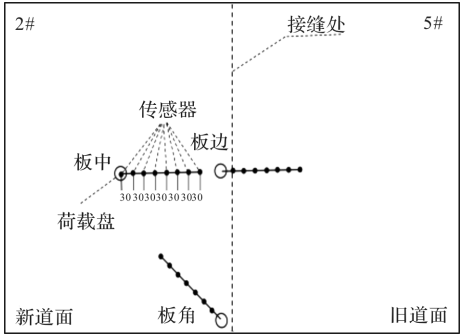


图 2 测点位置布设

Fig. 2 Measuring point location

2 有限元模型建立

2.1 几何特征及材料参数

采用 ABAQUS 对华东地区某机场新旧道面结构建立模型, 单块道面板尺寸为 5.0 m×5.0 m×0.4 m, 水泥混凝土板数量为 3×2 块, 即在新旧道面接缝处的两侧各布置 3 块新旧水泥混凝土板。假定整个道面结构层为连续均质、各向同性的线弹性材料, 道面板选取 C3D27R 二次六面体减缩积分单元, 板间采用 tie 连接。新旧道面接缝宽度 10 mm, 采用虚拟材料层法模拟接缝处填料。通过现场试, 如图 3 和图 4, 计算机场道面结构的实际参数, 材料参数见表 1。



图 3 水泥混凝土抗折试验

Fig. 3 Flexural test of cement concrete



图 4 地基反应模量试验

Fig. 4 Test of subgrade reaction modulus

表 1 材料参数

Tab. 1 Structural and material parameters of pavement

结构	弹性模量/MPa	泊松比	线膨胀系数/ 10 ⁻⁵ · ℃ ⁻¹	导热系数/ W · (m · ℃) ⁻¹
旧道面	35 000	0.18	1.05	1.7
新道面	40 000	0.16	1.05	1.8
嵌缝料	600	0.06	0.25	0.05

飞机主起落架下方所在的 2# 或 5# 道面板单元网格局部加密, 相邻道面板网格划分尺寸较密, 如图 5。不再对道面板下基层和土基建立实例模型, 而是简化为以反应模量 K 值表征^[20]。通过对板底施加弹性支撑, 对面层限制水平方向的运动^[21], 道面结构基顶反应模量取 105.5 MN/m³。

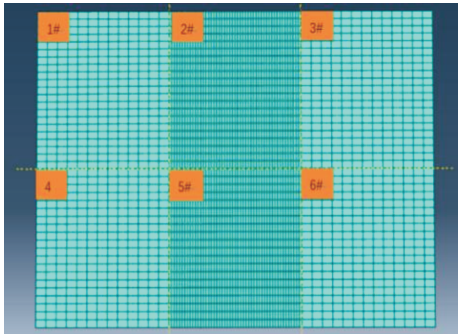


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

2.2 荷载施加

根据该机场实际运行情况, 选取具有代表性的型号 B737-800(单轴双轮)民航客机, 飞机主起落架参数见表 2^[22]。飞机在机坪区域内低速滑行过程中对道面结构将产生附加动荷载, 另外升力可忽略不计, 结合现有文献研究成果^[23], 以飞机静止荷载为基准, 动载按不利状态下取静载值的 1.3 倍进行加载。主起落架轮印可按面积近似相等的原则, 假定为矩形。取单个主起落架机轮作为研究对象, 加载荷位与板边中部边缘垂直, 以 2 种位置作用下产生的板底应力较大值作为判定不利荷位的依据。同时提取道面板上不同位置处弯沉值,

荷载位置如图6.

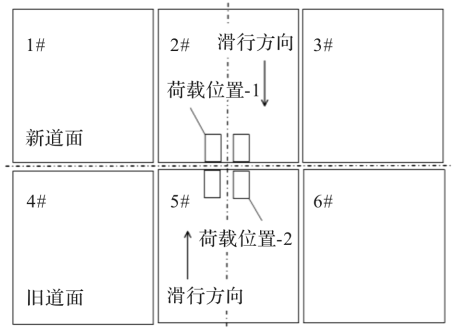


图6 荷载作用位置

Fig. 6 Position of loading action

2.3 温度场

道面结构表面受自然环境下的温度影响较为剧烈,并随时间呈周期性变化.已有学者研究板内温度场沿深度方向的线性变化和非线性变化对板内应力和弯沉值等差异性影响,结果表明板内温度场呈非线性分布更符合板内温度梯度的实际情况.考虑温度梯度变化对板内温度应力的影响,正温度梯度的产生的应力偏大^[19-20,24].故在正温度梯度情况下对新老水泥混凝土道面两侧道面施加荷载,对新老道面板表面分别施加 15℃、30℃、45℃、60℃.

表2 飞机相关参数

Tab. 2 Parameters of aircraft

机型	最大滑行重量/kN	最大着陆重量/kN	主起落架荷载分配系数	主起落架间距/m	主起落架数量/个	主起落架轮距		主起落架轮胎压力/MPa
						St/m	S _{L1} /m	
B737-800	792.60	663.80	0.95	5.72	2	0.86	-	1.47

3 结果及分析

3.1 弯沉变化分析

根据现场实测和数值计算的各测试点荷载中心弯沉值,二者总体变化趋势基本一致,如图7.在不同温度环境下,当荷载作用在位置-1或位置-2处时,道面板的板中弯沉变化不够明显,表明板中弯沉基本不受温度变化的影响.板边和边角的弯沉受温度影响显著,其变化规律基本一致,由15℃升高至60℃时,道面板表面温度越高,板边板角弯沉值就越小.如在现场测试中,2#板、5#的板中、板边、板角弯沉减小了4.2%、19.8%、20.1%,5.1%、18.2%、22.1%.另外,2#板和5#板的板中弯沉值均小于板边、板角弯沉值,表现出具有板角弯沉>板边弯沉>板中弯沉的特点,板角受到温度影响较为敏感.实际道面结构中板底与基层紧密接触,这与面板四边处于自由状态不同,此时若发生无约束状态下自由板面翘曲现象很难,温度越高道面板表面胀缩现象就越剧烈,故沉降变形有越来越小趋势.

从图7可知,2#板荷载中心处产生的板中、板边、板角弯沉最大值均要比5#板小,板中、板边、板角分别小于21.1%、23%、18.1%.原因在于新旧道面结构设计不同,旧道面投入使用较早,年久失修,2#板的弹性模量大于5#板,对比分析表明增大弹性模量可以有效抵抗道面板弯沉变形,避免因新旧道面板弹性模量差值过大,导致新旧道面接缝处两侧产生错台现象.

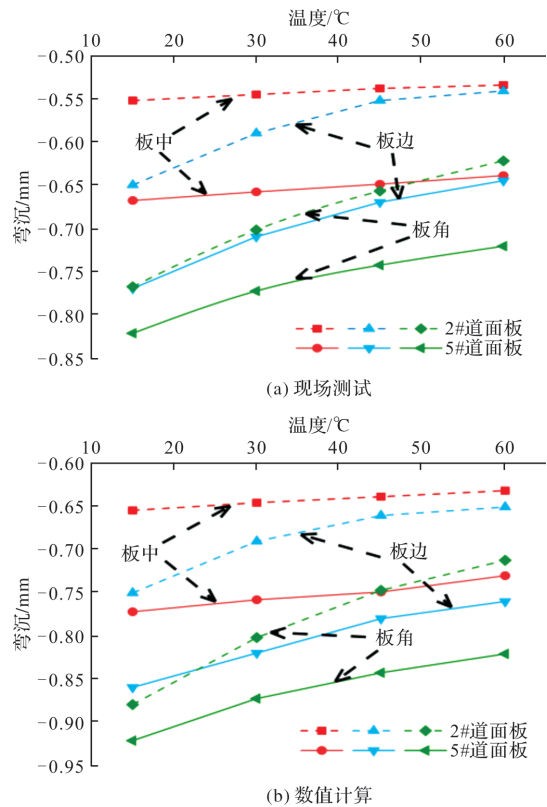


图7 不同温度条件下道面的弯沉值

Fig. 7 Deflection value of pavement under different temperatures

3.2 接缝传荷能力分析

在道面结构接缝性能评价中,采用接缝处两侧板边的弯沉变形值之比(传荷系数)表征接缝传荷能力^[11],机场水泥混凝土道面的传荷能力标准见表3.

从图8中可知,在不同温度环境下,当荷载作用在位置-1或位置-2时,通过现场测试和数值计算对比分析,可看出新旧道面板接缝传荷能力的变化规律基本一致.当温度由15℃升高至60℃

时,表明传荷系数与温度呈现出良好的二次曲线关系,温度对传荷能力具有显著的影响,具体表现为新旧道面板接缝传荷能力随温度升高而增大,但曲线又逐渐趋于平缓。这是因为道面板间传荷是通过接缝间的集料嵌锁和基层支撑作用实现的,在荷载作用下,道面板发生横向水平变形,使得相邻板块接触面间的间距发生变化。另外,接缝处填缝料受温度影响而发生膨胀现象,通过改变新旧道面板缝隙张开程度,改变了填缝料的嵌锁作用。

表3 接缝传荷能力等级评价标准

Tab.3 Evaluation standard for joint load transfer capacity

评定等级	好	中	次	差
LTE/%	>80	80~56	55~31	31

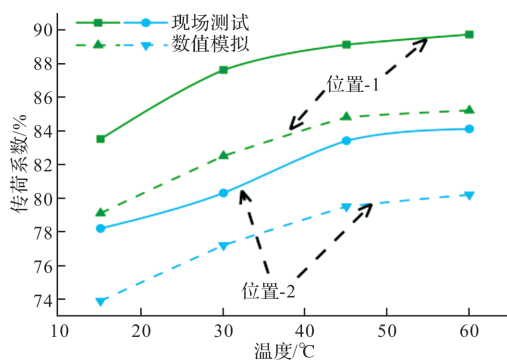


图8 不同温度条件下板边传荷系数

Fig.8 Joint load transfer of slab edge under different temperatures

在相同温度条件下,由图8可知,当荷载作用在位置-1处产生的传荷能力大于均位置-2处。如在60℃时,经现场测试、数值模拟计算出新旧道面板的传荷系数分别为89.7%、84.1%,85.2%、80.2%,

分析表明新道面板弹性模量大于旧道面板,弹性模量在一定程度上可增强接缝处板间应力扩散传递,降低受荷板及未受荷板间沉降变形幅值,更好地使未受荷道面板块与受荷板块共同承担荷载。但从另一角度也说明了新旧道面板弹性模量差值不大,对传荷能力影响有限。结合现场测试,表明数值计算和现场测试计算出的传荷系数间误差较小,结果较为稳定、可靠。

3.3 脱空评价分析

在机场水泥混凝土道面结构性能评价中,板底脱空评价是一项重要内容。板底脱空会引起道面板错台损坏和板内应力增加,从而造成道面结构断裂,产生重大安全隐患。现有评价规范中通过“板边弯沉值/板中弯沉值”和“板角弯沉值/板中弯沉值”来评价道面板的板底脱空情况。图9和图10分别为在现场测试和数值计算中板边和板角随道面板表面温度变化的脱空评价。

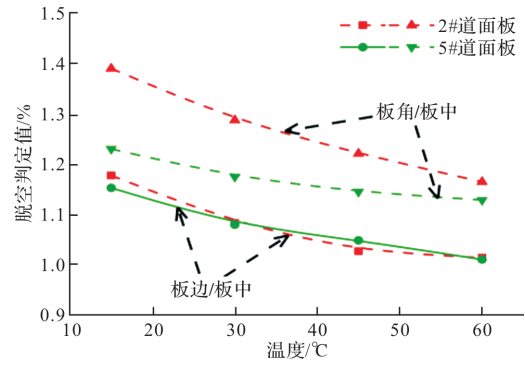


图9 板边/板中值变化趋势-现场测试

Fig.9 Variation trend of slab edge/slab interior-field test

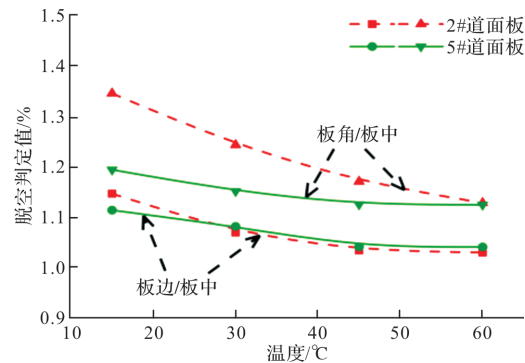


图10 板角/板中值变化趋势-数值计算

Fig.10 Variation trend of slab corner/slab interior-numerical calculation

从图9、图10可知,随着道面板表面温度变化,板边和板角脱空判定值均呈现不同程度的变化,但二者总体变化规律基本一致。如在现场测试中,2#、5#板的板边脱空判定值范围分别为1.0~1.2、1.0~1.2,板角脱空判定值范围分别为1.1~1.4、1.1~1.3,表明在不同温度环境下将会得到不同的脱空判定结果,但2#板和5#板的板边脱空判定值差异性变化不大,板角脱空判定值也是如此,主要原因在于道面板和旧道面板的弹性模量差值不大。按照道面评价规范标准,在不同温度环境下,当荷载作用在位置-1或位置-2时,板边/板中值均小于2.0,板角/板中值均小于3.0,故不存在脱空现象。

3.4 板内应力分析

一般地将水泥混凝土板底的拉应力作为确定最不利荷位的评价指标,已有学者研究认为在负温度梯度下,板顶拉应力很小且稳定,而板底拉应力对道面结构破坏最大。目前关于板内温度应力的研究多局限在数值模拟计算,由于试验条件有限,本文基于上述研究,通过数值模型计算板底拉应力,新旧道面板的板底拉应力随温度变化趋势,如图11所示。在仅受温度作用下,随着温度升高,板底拉应力逐渐增大。原因在于道面板表面的温度随自然环境下的温度呈现周期性变化,

当道面板内形成温度梯度时,路面板将出现不同程度的胀缩与翘曲变形,但由于受到自身重力或相邻道面板的约束,板内将产生温度应力,导致板内裂缝的产生与扩展。

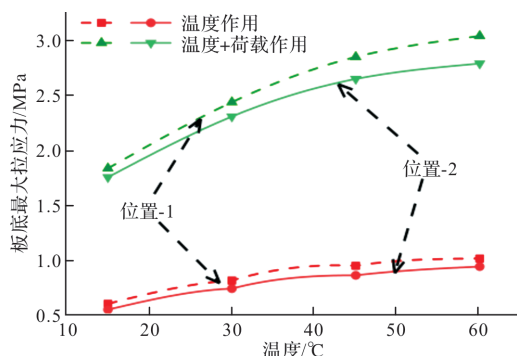


图 11 不同温度条件下板底应力的变化趋势

Fig. 11 Variation trend of slab bottom tensile stress under different temperatures

如再施加荷载,道面板底部受拉,顶部受压,板中将明显发产生翘曲趋势,板底拉应力加剧变大.随着温度的升高,会加大道面板间相互挤压效应而产生较大的板底应力.故在道面结构设计中,应充分考虑温度对板底拉应力的影响,避免发生由板底向板顶的开裂破坏。

在相同温度环境,无论是在温度还是温度-荷载作用下,2#板的板底拉应力一直大于5#板.当温度-荷载作用在位置-1和位置-2时,在15℃、30℃、45℃、60℃环境下分别增大5.2%、5.7%、7.3%、8.4%,表明增大道面板弹性模量,板底拉应力也会增大,但可以看出,弹性模量对板底拉应力的影响程度较小.在新旧道面结构设计中,并不是通过减小道面板弹性模量方法来降低板底拉应力。

4 结论

在自然环境中,水泥混凝土道面板内的温度具有周期性变化和沿深度非线性分布的特点.本文依托华东地区某机场工程项目,基于现场测试,采用有限元数值计算在不同温度条件下通过主起落架分别作用在新旧道面上,探讨分析道面板呈现“非平板”状态下板底的受力特性和接缝的传荷能力等,主要结论如下:

(1)板底脱空和接缝传荷能力评价以弯沉为基础,因而需要考虑温度对新老道面板的作用.开展现场弯沉测试应考虑温度的影响,以保证评价结果的准确性和可靠性;

(2)传荷系数均受弹性模量和温度因素影响,弹性模量在一定程度上可增强接缝处板间应力扩散传递.在不同温度条件下,新老道面接缝的传荷系数是不断变化的,与温度呈较好的二次曲线

关系;

(3)随温度升高,道面板间因挤压效应使得板底应力较大,同时主起落架作用在板底的集中应力无法有效地释放,板底拉应力显著增大.在板底的最大拉应力大于设计弯拉强度时,道面板将出现开裂破坏;

(4)为避免新老道面板发生错台或开裂破坏,增大弹性模量会提高接缝传荷能力,但也会增大板底拉应力.建议可考虑增大板厚等措施,针对新老道面板接缝处力学传递的研究有待进一步研究。

参考文献 References

- [1] 王国业,胡昌斌,杨建军.路面板温度翘曲变形对基层的作用分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009,25(5):895-898.
WANG Guoye, HU Changbin, YANG Jianjun. Analysis of the effects of temperature warping deformation on base[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2009, 25(5): 895-898.
- [2] RAO S, ROESLER J R. Nondestructive testing of concrete pavements for characterization of effective built-in curling[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2005, 33(5): 356-363.
- [3] YEON Jungheum, CHOI Seongcheol, HA Soojun, et al. Effects of creep and built-in curling on stress development of Portland cement concrete pavement under environment loadings[J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(2): 147-155.
- [4] HANSEN W, WEI Y, SMILEY D L, et al. Effects of paving conditions on built-in curling and pavement performance[J]. Transportation Research Record Journal of Pavement Engineering, 2006, 7(4): 291-296.
- [5] MACKIEWICZ Piotr. Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 1169-1176.
- [6] NAM Boohyum, YEON Jungheum, BEHRING Zachary. Effect of daily temperature variations on the continuous deflection profiles of airfield jointed concrete pavements[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 261-270.
- [7] 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 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): 17-26.
- [8] 张万志,徐帮树,李兵,等.东北地区机场混凝土道面温度翘曲试验研究[J].中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(9): 2308-2315.
ZHANG Wanzhi, XU Bangshu, LI Bing, et al. Experimental research on temperature warping of airport ce-

- ment concrete pavement in northeast China[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018,49(9):2308-2315.
- [9] 杨来华. 吉林松原机场混凝土道面温度翘曲试验与变形控制[J]. 公路, 2020, 65(9):65-69.
YANG Laihua. Temperature warping test and deformation control of concrete pavement in Jilin Songyuan airport[J]. Highway, 2020, 65(9):65-69.
- [10] 陈双, 莫忱, 胡建. 高温尾喷作用下水泥混凝土道面的疲劳损伤[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(2):194-201.
CHEN Shuang, MO You, HU Jian. Fatigue damage of cement concrete pavement under high temperature tail spray[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(2):194-201.
- [11] 戚春香, 杨简, 崔晓云, 等. 基于挠度传荷系数的机场道面接缝刚度模型[J]. 中国民航大学学报, 2017, 35(2):31-34, 40.
QI Chunxiang, YANG Jian, CUI Xiaoyun, et al. Research on joint stiffness model of airport rigid pavement based on deflection coefficient[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2017, 35(2):31-34, 40.
- [12] 魏亚, 梁思明, 和昆, 等. 温度与荷载耦合下农村公路混凝土路面结构尺寸优化[J]. 工程力学, 2015, 32(7):111-117, 142.
WEI Ya, LIANG Siming, HE Kun, et al. Slab-size optimization of rural road concrete pavement considering the combined effect of temperature gradient and traffic load[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7):111-117, 142.
- [13] 郝培文, 张兰峰. 基于连续变温的沥青路面温度应力分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(2):176-183.
HAO Peiwen, ZHANG Lanfeng. Asphalt pavement temperature stress analysis based on continuous variable temperatures[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50(2):176-183.
- [14] GUO Edward H, MARSEY Wayne. Verification of curling in PCC slabs at the nation airport pavement test facility [C]//Advancing airfield pavements. proceedings of the 2001 airfield pavement specialty conference. Chicago Iuinois United States: American Society of Civil Engineers, 2001:15-29.
- [15] 赵鸿铎, 马鲁宽. 基于实测数据的机场水泥道面变温效应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(12):1764-1771.
ZHAO Hongduo, MA Lukuan. Investigation into effects of temperature variations on airport cement pavemenmts based on measured data[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(12):1764-1771.
- [16] 刘海伦, 李萌, 杜浩. 机场水泥道面动态弯沉的温度影响分析[J]. 中国民航大学学报, 2018, 36(3):18-21, 30.
LIU Hailun, LI Meng, DU Hao. Temperature effect on dynamic deflection of airport concrete pavement[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2018, 36(3):18-21, 30.
- [17] 吴文亮, 赵为天, 熊春龙. 机场水泥混凝土道面实测弯沉值的温度影响分析[J]. 中外公路, 2020, 40(3):85-90.
WU Wenliang, ZHAO Weitian, XIONG Chunlong. Temperature influence analysis of measured deflection value of airport cement concrete pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3):85-90.
- [18] VANDENBOSSCHE Julie M. Effects of slab temperature profiles on use of falling weight deflectometer data to monitor joint performance and detect voids[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2005(1):75-85.
- [19] 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 Changbin, ZENG Huizhen, 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.
- [20] 张建霖, 郑小平. 机场道面的地基反应模量及承载力分析[J]. 土木工程学报, 2005(5):72-76.
ZHANG Jianlin, ZHENG Xiaoping. Analysis of response modulus and load-bearing capacity of the foundation for airport pavement[J]. China Civil Engineering Journal, 2005(5):72-76.
- [21] 王丽娟, 胡昌斌. 水泥混凝土路面固化温度区域特征及其对面板翘曲的影响[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(3):19-33.
WANG Lijuan, HU Changbin. Built-in temperature's regional characteristics of cement concrete pavement and its effect on slab curling. [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(3):19-33.
- [22] 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 Communication Press, 2010.
- [23] 张甲峰, 钱建固, 吕玺琳, 等. 飞机移动荷载作用下跑道地基响应范围变化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1):101-104.
ZHANG Jiafeng, QIAN Jiangu, LÜ Xilin, et al. Influencescope of airport runway ground under aircraft moving loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1):101-104.
- [24] HILLER Jacob, ROESLER Jeffery R. Simplified non-linear temperature curling analysis for jointed concrete pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136:654-663.