

高胎压下机场环氧沥青道面结构动力响应分析

凌建明, 朱立国

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 新一代飞机(B787和A350/380)轮胎充气压力普遍达到了1.5 MPa,这进一步加剧了重载高胎压对沥青道面结构响应的影响,而热固性环氧沥青混合料因其优异的力学性能成为重载高胎压条件下的理想选择.基于ABAQUS建立了考虑竖向接触应力不均匀分布的机场环氧沥青道面结构动力响应三维有限元模型,并利用现场足尺加速加载试验结果对模型进行了验证.在此基础上,就接触应力分布、轮胎充气压力大小、温度场分布和道面结构材料特性等因素对道面结构响应的影响进行了分析.结果表明:不均匀接触应力增大了道面结构响应量;重载高胎压条件下,从减少车辙和开裂的角度而言,环氧沥青铺装材料较沥青玛蹄脂混合料具有更好的适用性,但要注意防止中、下面层的塑性变形累积和环氧沥青层底的弯拉疲劳开裂.

关键词: 胎压; 不均匀分布; 有限元; 车辙; 开裂

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

Dynamic Response Analysis of Airfield Epoxy Asphalt Pavement Under High Tire Inflation Pressure

LING Jianming, ZHU Ligu

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The aircrafts of new generation, like Boeing 787 and Airbus 350/380, have tire inflation pressure up to 1.5 MPa, which increases the effects of aircrafts with heavy gross weights on pavement response. The epoxy asphalt pavement becomes an ideal choice due to its excellent mechanical properties. A 3-D finite element model of airfield epoxy asphalt pavement under non-uniform moving aircraft tire loads was established by ABAQUS and it was validated with field measurements of accelerated pavement test. The effects of tire-pavement contact stress distribution, tire inflation pressure, different temperature profiles and material characteristics were discussed with the finite element model.

The results indicated that non-uniform distribution of tire-pavement contact stress increased pavement strains; epoxy asphalt pavement was a better choice in terms of decreasing rutting and cracking under heavy aircraft loads; however, fatigue cracking of the bottom of epoxy asphalt layer and permanent deformation of the AC layer should be emphasized.

Key words: tire inflation pressure; non-uniform distribution; finite element; rutting; cracking

沥青道面结构响应及性能衰变规律受荷载条件的影响显著,在公路和机场场道领域,许多学者针对荷载大小及作用频率、轮胎充气压力和三向不均匀接触应力等因素进行了分析^[1-3]. Machemehl^[4]等的分析结果表明随着卡车轮胎充气压力的增大,沥青层层底的弯拉应力增大,进而导致道面疲劳寿命的缩短.与卡车轮胎相比,飞机轮胎载重更大且充气压力普遍介于1.2~1.5 MPa之间,因此,其更易引起道面结构性能的加速衰变.此外,新一代飞机(B787和A350/380)的轮胎充气压力普遍超过了1.5 MPa,这进一步加剧了重载高胎压对沥青道面结构响应的影响.

在重载和高胎压条件下,轮胎与道面的接触应力在空间分布上也呈现出显著的非均匀性,大量实测结果表明随着载重的变化,飞机轮胎边缘的竖向接触压力高达轮胎充气压力的1.5~3倍^[5-8]. Wang^[9]基于有限元模型的分析结果表明高胎压条件下不均匀接触应力会引起更大的表面剪应变、压应变和偏应力,进而导致更大的车辙深度. Fabre^[10]等也强调在分析高胎压对上面层的影响时需要着重考虑竖向接触应力的不均匀分布.实际上,轮胎-道面接触应力不均匀分布会在道路表面附近引发复杂的应力状态,加剧了top-down开裂, near-surface开裂和车辙的产生^[11].因此,重载高胎压条件下需要寻

收稿日期: 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(U1433201, 51278364)

第一作者: 凌建明(1966—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为道路与机场工程. E-mail: jmling@tongji.edu.cn

通讯作者: 朱立国(1988—),男,博士生,主要研究方向为道路与机场工程. E-mail: lgzhu08@126.com

找具备高稳定度高抗剪强度的面层铺装材料。

热固性环氧沥青混合料具有优越的力学性能,兼顾了普通沥青道面和水泥混凝土道面的双重优势,在钢桥面铺装领域应用广泛。在机场场道领域,为提高道面的耐腐蚀性和耐高温尾喷,1959 年美国空军基地首次应用^[12],但由于技术不成熟和成本高昂,推广应用受到了限制。随着新一代飞机的不断投入运营,环氧沥青铺面材料由于其强度高、耐久性好、环境适应性强等优点,又逐渐回到了人们的视野中。冉武平^[13]在国内首次针对机场新建环氧沥青道面和“白+黑”复合道面进行了现场足尺加速加载研究,对道面结构响应和性能衰变规律进行了探索。

本文建立了高胎压条件下考虑竖向接触应力不均匀分布的机场环氧沥青道面结构动力响应三维有限元模型,并利用现场足尺加速加载试验结果对模型进行了验证。在此基础上,就接触应力分布、轮胎充气压力大小、温度场分布和道面结构材料特性等因素对道面结构响应的影响进行了分析。分析结果有助于明确新一代飞机高胎压下环氧沥青道面结构响应和性能衰变规律,同时也为环氧沥青道面铺装材料在机场的应用进行了理论探索。

1 轮胎-道面不均匀接触压力

轮胎-道面竖向接触应力分布存在显著非均匀性,许多学者利用传感器进行了大量实测工作,其中包括了针对航空轮胎的测试。本文参照空客高胎压技术组 Rolland^[8]重载条件下的测试结果,假定竖向接触应力沿纵向成半正弦分布,如图 1a 所示,横向分为 5 个条带,边缘 2 个条带的峰值应力等于轮胎充气压力的 2.5 倍,中间 3 个条带的峰值应力等于充气压力的 1.2 倍^[9],飞机轮胎-道面竖向接触应力分布一般表现为中间小、两侧大,中间条带接触压力较小,两侧条带接触压力较大,这与汽车轮胎-道面竖向接触应力的分布恰恰相反。鉴于轮胎侧壁提供的横向刚度远高于轮胎纵向刚度,分析中假定随着轮胎充气压力的增大,横向接触宽度保持不变,纵向接触长度逐渐减小。

本文分析中单轮荷载约为 270 kN,轮胎充气压力分为 1.45 MPa 和 1.69 MPa 两级,轮印接触区域参照 NAPTF (National Airport Pavement Test Facility)的测试结果^[9]。同时为了进行对比,另假定接触区域内竖向接触应力均匀分布且等于充气压力,如图 1b 所示,接触区域和接触应力汇总于表 1。

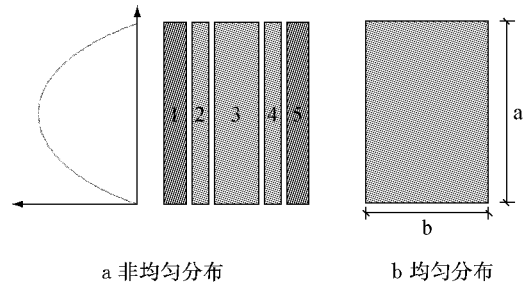


图 1 轮胎-道面接触应力分布假设

Fig.1 Tire-pavement contact stresses assumptions

表 1 轮印接触区域及竖向接触应力分布
Tab.1 Contact areas and vertical contact stress distributions

条带编号	轮印宽度/mm	胎压 1.45 MPa		胎压 1.69 MPa	
		轮印长度/mm	峰值应力/MPa	轮印长度/mm	峰值应力/MPa
条带 1	60	520	3.63	440	4.23
条带 2	50	520	1.74	440	2.11
条带 3	120	520	1.74	440	2.11
条带 4	50	520	1.74	440	2.11
条带 5	60	520	3.63	440	4.23
间隔	15	520	0	440	0
均布	340	540	1.45	460	1.69

2 三维有限元模型及验证

2.1 模型几何特征

利用 ABAQUS 建立了机场环氧沥青道面结构响应分析三维有限元模型,选择足尺加速加载测试中新建道面的结构组合形式如图 2 所示,建立的有限元模型几何形式如图 3 所示。模型选用八节点线性缩减积分单元(C3D8R),为减小模型尺寸同时防止界面处波的反射对道面结构动力响应分析的影响,使用无限单元(CIN3D8)作为边界条件。为了平衡计算精度和计算代价,轮迹带加载区域网格划分较为细密,远离加载区域网格划分则逐渐变粗。加载

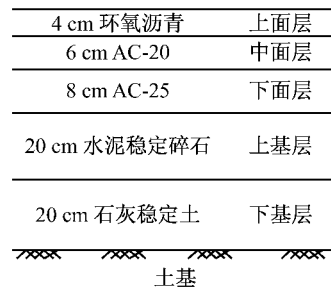


图 2 足尺加速加载断面结构形式
Fig.2 Section structure in full-scale accelerated pavement test

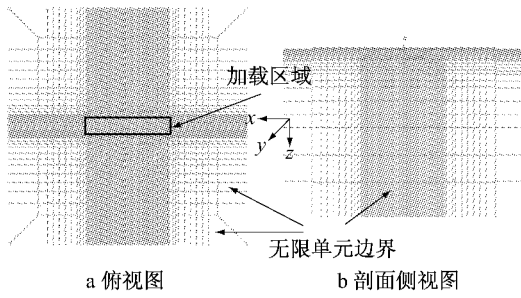


图 3 有限元模型俯视图和侧视图

Fig. 3 Plane-view and cross-view of the developed finite model

区域沿横向的网格划分依据轮胎-道面接触区域来确定;加载区域纵向(行驶方向)长度为 1.4 m,纵向网格步长为 0.02 m,面层单元厚度为 0.01~0.02 m,基层单元厚度为 0.05~0.10 m,土基单元厚度为 0.20~0.40 m,文献[14]建议无限单元边界距离荷载作用中心点宜为 0.76~1.2 m,因此,最终选定的模型尺寸为 $3 \times 3 \times 2 \text{ m}^3$ 。

2.2 隐式动力分析及结构阻尼

动力分析可以采用隐式或显式积分法,对于类似飞机荷载作用下的道面结构动力响应问题采用隐式分析方法通常更为有效^[15-16],即

$$\{P\} = [M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} \quad (1)$$

式中: $[M]$, $[C]$, $[K]$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$, $\{U\}$ 分别为加速度、速度和位移向量; $\{P\}$ 为外力向量。

由于在外部荷载作用下,仅部分低阶模态被激发,因此分析时可以忽略更高阶频率对动力响应的影响。同时为了兼顾收敛性和计算精度的要求,临界时间增量步可按照下述方法^[17]确定:依据荷载速度确定最高加载频率 ω_u ;时间增量步 t 约等于 $0.05T$,其中 $T=2\pi/\omega_{co}$, $\omega_{co}=4\omega_u$, ω_{co} 为动力分析中的临界频率。

对于弹性材料,动力分析中需要确定其阻尼参数,较为通用的是“Rayleigh”阻尼,计算方法见式(2),对于多自由度系统其振型阻尼比 ξ_i 按式(3)计算,式中 ω_i 为对应圆频率。对于土木工程而言,一般可取 $\xi_i = \xi_j = 0.05$ ^[18],因此质量阻尼系数 α_R 、刚度阻尼系数 β_R 可按式(4)~式(5)计算。在道面结构动力学分析中,一般不考虑道面结构体的扭转效应,可通过 ABAQUS 模态分析获得结构计算振动方向上的主振型,由此可得到对应的固有频率,乘以 2π 得到固有圆频率。共振试验结果表明,土壤的阻尼比介于 0.02~0.05 之间^[19],廖公云^[20]也给出了常见路面材料的阻尼比,综合文献结果,对于面层材料阻尼比统

一取 0.15,基层和地基材料则统一取 0.05。

$$[C] = \alpha_R[M] + \beta_R[K] \quad (2)$$

$$\xi_i = \frac{\alpha_R}{2\omega_i} + \frac{\beta_R\omega_i}{2} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \times \xi_i \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \times \xi_i \quad (5)$$

2.3 不均匀移动荷载的模拟

足尺加速加载测试采用单轮荷载,使用的是卡车轮胎,轮胎充气压力为 1 MPa,载重 50 kN,如图 4 所示。纵向仍假定为半正弦分布,横向分为 5 个条带,不同于重载条件下航空轮胎接触区域分布状况,卡车轮胎接触区域中间条带较长,而边缘条带略短,假定两端各短一个单元^[3]。肋骨宽度根据实测确定,依次为 4.7,3.4 和 3.4 cm。参照 De Beer^[21]对相近轮胎的研究,假定中间三个条带峰值应力近似为 1.8 倍充气压力,边缘两个条带近似为 1.5 倍充气压力。由此便可反算获得轮印空间分布的简化假定模型。

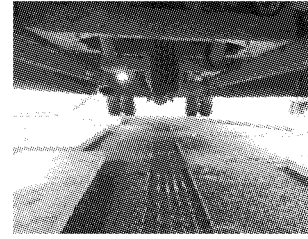


图 4 加速加载测试轮胎

Fig. 4 Tire in full-scale tests

为了模拟不均匀移动荷载,横向划分为 5 个条带,单元纵向长 0.02 m,加载速度为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,则每个单元加载时间为 0.0033 s。在 ABAQUS 中,通过 DLOAD 子程序实现不均匀接触应力的施加和移动,即调用内部坐标函数 COORDS(*)对图中不同单元施加大小不同的竖向接触应力,然后利用内部时间函数 Time(*)实现荷载的移动,并利用 Time(*)函数与设定的行车速度的乘积实现加载步长的控制。当网格划分的足够精细,荷载在每一个单元上停留的时间足够短,可以认为施加的荷载是连续的移动荷载。

2.4 模型验证

利用 MLS66 足尺加速加载试验结果进行模型验证,道面结构材料均假设为线弹性,不同温度和加载频率下环氧沥青层动模量通过室内试验测得,试验参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[22]中的动态频率扫描试验进行。依据时温等效原理,建立 20 °C 下环氧沥青混合料的动态模量主曲线,角频

率的对数 $\text{Log}(f/\pi)$ 与动模量的对数 $\text{Log}(E^*)$ 在试验频率和温度范围内近似满足线性关系. 因此, 20 °C 下的动模量主曲线方程可表示为式(6), 式中 $\Delta t(T)$ 为不同温度向 20 °C 平移的移位因子. 移位因子依据最小二乘法原则, 通过试算使 $\sum (y_i - \hat{y})^2$ 最小获得. 55 °C 下的移位因子通过 5, 20, 35 和 50 °C 下的移位因子线性外延获得.

$$E^*(f, T) = 10^{3.8494+0.156 \left\{ \log\left(\frac{f}{\pi}\right) - \Delta t(T) \right\}} \quad (6)$$

基层及土基模量利用弯沉测试数据反演获得, 各结构层温度则通过现场埋设的 PT100 温度传感器近似确定. FWD 荷载为加载频率 33 HZ 的半正弦波冲击荷载, 因此, 反演获得的其实是结构的“准静态”模量, 其一般显著高于材料的静态模量. 王旭东^[18] 利用模量反算方法得到的半刚性基层材料动态模量范围为: 2 000~8 000 MPa. 本文上、下基层的计算参数分别为 5 000 MPa 和 2 000 MPa, 最终确定的模型参数如表 2 所示. 分析过程中, 假定沥青层之间、基层和土基之间均处于完全绑定状态, 下面层和上基层之间为库伦摩擦, 摩擦系数取为 1.

表 2 有限元模型材料参数

结构层	温度 /°C	厚度 /cm	动态模量 /MPa	泊松比	密度 / (kg · m ⁻³)	阻尼比
上面层	55	4	1 100	0.30	2 200	0.15
中面层	50	6	450	0.35	2 200	0.15
下面层	44	8	1 100	0.35	2 200	0.15
上基层	35	20	5 000	0.20	2 100	0.05
下基层	25	20	2 000	0.20	1 900	0.05
土基	/	/	188	0.40	1 800	0.05

模型验证结果如图 5 所示. 由图 5 可知: 有限元计算结果和实测结果时程变化趋势基本一致, 幅值接近, 应变峰值相对误差约为 15%. 两者测试结果的不同可能是由轮胎-道面接触应力分布假定、现场应变计的埋设和数据采集、有限元中未考虑面层材料的粘性、室内试验获取的材料参数与现场并不完全一致等因素造成. 总体来看, 本文所建立的三维有限元模型的分析结果与现场实测响应规律基本一致, 可用于不均匀移动荷载作用下道面结构动力响应的分析.

3 结果分析

3.1 胎压及轮胎-道面接触应力分布的影响

将表 1 中轮胎-道面均布和非均布荷载施加给第 2 节所建立的有限元模型, 轮胎充气压力分别取

1.45/1.69 MPa. 选取层底弯拉应力(主要引发 bottom-up 裂缝)、剪应变和压应变(主要引起车辙、top-down 裂缝和 near-surface 裂缝)进行比较分析, 其中 1, 2, 3 分别对应图 3 中的 x, y, z 方向, 荷载沿 x 轴负向行驶, 即 E11 为纵向弯拉应变、E22 为横向弯拉应变、E33 为竖向压应变、E13 和 E23 分别为平行和垂直于行驶方向的剪应变.

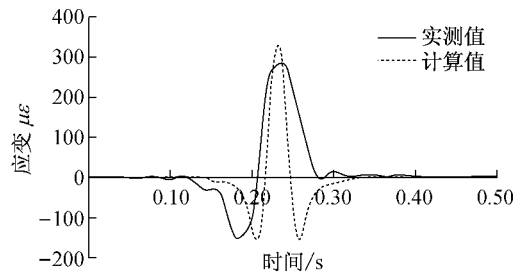
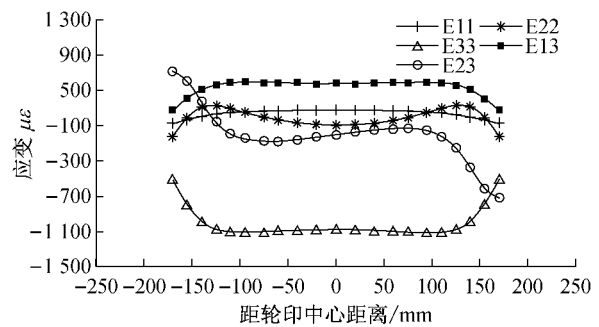
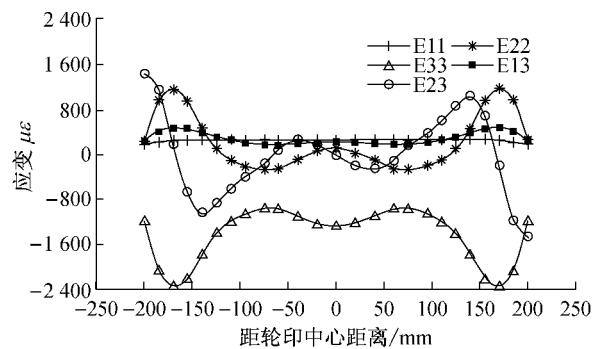


图 5 环氧沥青层底纵向应变实测值与计算值

Fig.5 Calculated and measured longitudinal strains on the bottom of epoxy asphalt



a 均匀分布



b 非均匀分布

图 6 胎压 1.45 MPa 下环氧沥青层底应变横向分布

Fig.6 Strains of the bottom of epoxy asphalt layer under tire pressure of 1.45 MPa

以环氧沥青层底应变为例, 对轮迹带内应变横向分布进行分析. 结果表明, 1.45/1.69 MPa 两个级别的充气压力下环氧沥青层底应变的横向分布规律表现一致. 将 1.45 MPa 胎压下的计算结果绘于图 6, 分析图 6 得到的主要结论如下:

(1)层底纵向弯拉应变 E11 峰值出现在轮印中心,而横向弯拉应变 E22 峰值出现在靠近轮胎边缘第一个肋骨内.非均布接触应力假设条件下,E22 增大了 2.48 倍而 E11 变化相对较小,且 E22 峰值显著大于 E11.因此,对于环氧沥青层底应重点考察横向弯拉应变,且非均布假设条件下环氧沥青层底更易发生疲劳开裂.

(2)均布假设条件下,环氧沥青层底竖向压应变 E33 在轮印中部基本保持不变,但在轮印边缘突然减小.在非均布假设条件下,E33 产生了多个峰值,且幅值达到均布假设条件下的 2.13 倍.

(3)剪应变 E23 峰值均出现在轮胎边缘,E23 大于 E13,在均布和非均布假设条件下两者比值分别为 1.20 和 2.98.非均布较均布假设条件下,E23 峰值增大了 1.03 倍,而 E13 减小了 18%.

为进一步分析接触应力不均匀分布带来的影响,将剪应变沿面层厚度的分布状况绘于图 7.由图 7 可知,两种胎压条件下,轮胎-道面接触应力不均匀分布带来的影响规律一致,即各层位的剪应变 E23 增大且随着胎压增大影响更为显著,而 E13 略有减小.E23 较 E13 受不均匀分布假定的影响更为明显,但在下面层两者所受影响较小.

非均布接触应力分布假设条件下,E23 峰值上移至中面层顶部,而 E13 峰值仍出现在中面层底部.然而,从平面位置看,不均匀接触压力下 E13 峰值出现在轮胎边缘附近,而均布接触压力下出现在轮胎中心区域.

综合来看,在轮胎-道面非均布接触应力假设条件下,环氧沥青层底弯拉应力显著增大,而面层表面附近的应力状态变得更为复杂.轮胎边缘的高接触应力引起局部应力集中,导致深度 10 cm 范围内的剪应变增大,且其绝对值大于弯拉应变峰值,进而加剧了 near-surface 开裂和 top-down 开裂.

在上文分析的基础上,提取临界部位不同深度处的应变,将非均布荷载作用下的结果绘于图 8.分析图 8 可知,不同胎压条件下,应变沿面层深度的分布规律一致,且随着轮胎压力的增大,各层应变均有所增大.各应变均在深度 4.75 cm 处产生拐点,1.69 MPa 较 1.45 MPa 胎压条件下,该层位应变 E22、E33 和 E23 分别增大 13.4%、16.9%和 14.4%.特别的,剪应变 E23 存在两个峰值,且均位于 AC-20 层,高温环境中在荷载的反复作用下该层位极易产生强度衰减和过量的塑性变形累积,进而导致环氧沥青层底弯拉应力的增大,加剧道面结构的整体疲

劳破坏,引起道路使用性能和耐久性下降,这作为道面结构设计控制的关键,应引起关注.

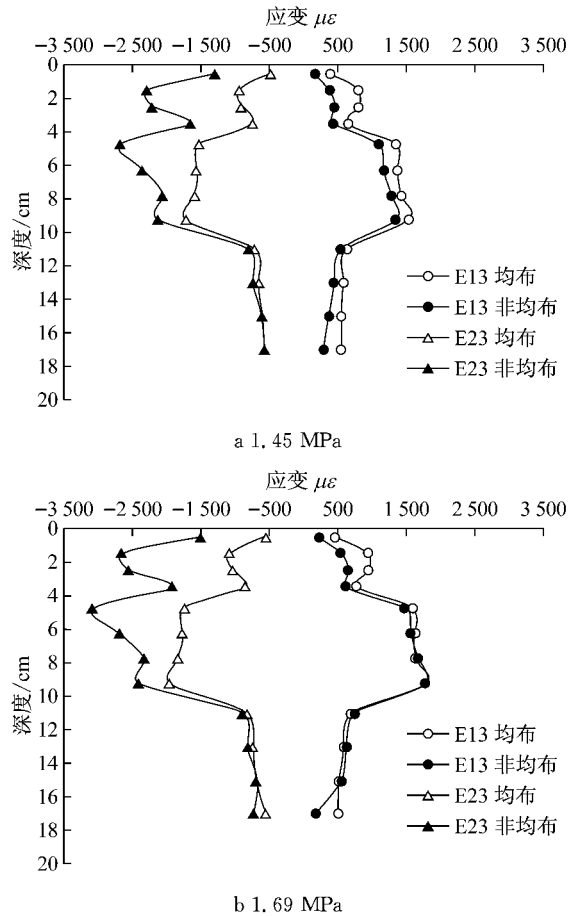


图 7 不同荷载条件下剪应变纵向分布
Fig.7 In-depth distribution of shear strains for various loads

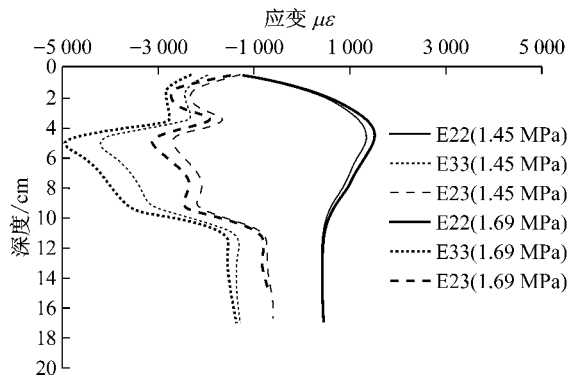


图 8 临界应变竖向分布
Fig.8 In-depth distributions of critical strains

进一步分析横向弯拉应力 S22 可知,沿厚度方向最大拉应力出现在环氧沥青层层底.这主要是由于环氧沥青为热固性材料,其动模量受温度影响相对较小,在试验温度场条件下形成了上面层、下面层

模量高,而中面层模量低的典型道面结构组合,使得环氧沥青层底部产生显著的弯拉应力.实际运营中道面 bottom-up 裂缝的产生会随道面厚度的增加而显著减小,因此,压应变和剪应变引起的路表附近的辙槽和 top-down 裂缝更加需要关注.

3.2 温度场分布的影响

将表 2 中面层温度场分布进行倒置,同时忽略温度对基层和土基材料参数的影响,即上、中、下面层温度分别取 44,50 和 55 °C,对应动态模量分别为 1 900,450 和 450 MPa.移动荷载采用非均布假设,轮胎充气压力取 1.45/1.69 MPa,将应变沿厚度的分布状况绘于图 9.

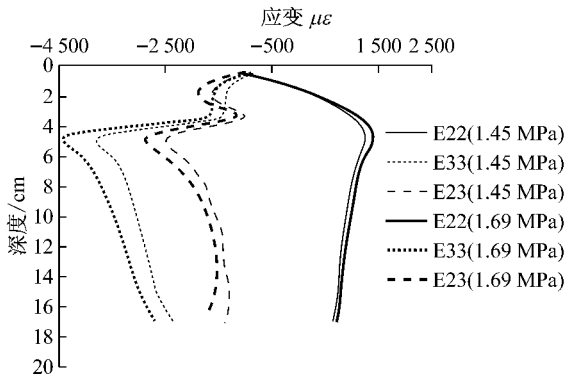


图 9 假定温度条件下临界应变竖向分布
Fig.9 In-depth distributions of critical strains using reversed temperature profiles

由图 8 和图 9 可知,假定温度条件下 E22 和 E33 峰值仍出现在深度 4.75 cm 处,但较足尺试验温度条件下减小 10%左右. E23 峰值也出现在深度 4.75 cm 处,随深度增加,中面层和下面层内剪应变值先增大后减小,且总体处于较高水平,说明中下面层内易产生较大的塑性变形,进而导致底部弯拉应力的增大.在假定温度条件下,胎压越高,临界应变值越大,这与 3.1 节规律一致,说明高胎压对结构响应的影响与温度场分布无关,但影响程度略有差别.1.69 MPa 胎压条件下,E22, E33 和 E23 较 1.45 MPa 下分别增大 12.6%,16.8%和 16.0%.

进一步分析环氧沥青层层底弯拉应力可知,假定温度场下,高低胎压对应的弯拉应力峰值分别达到 1.36 MPa 和 1.55 MPa,较足尺试验温度场下显著增大,说明在上面层模量大大高于中下面层模量的结构层组合条件下,极易在环氧沥青层底部引起弯拉疲劳开裂.

3.3 上面层材料类型的影响

将表 2 中上面层材料替换为 SMA-13,中面层及

以下道面结构保持不变. SMA-13 的参数取值参照姚连军^[23]的测试结果,模型分析中近似取为 500 MPa.移动荷载采用非均布假设,轮胎充气压力取 1.45/1.69 MPa,将应变沿厚度的分布状况绘于图 10.

由图 10 可知,临界应变最不利位置上移至 2.5 cm 处,即 SMA 层,且 E22, E33 和 E23 峰值较 3.1 节显著增大,增大幅度均在 20%以上,说明在高胎压条件下 SMA 上面层极易产生辙槽和表层开裂.从防止辙槽和 top-down 开裂的角度而言,环氧沥青铺装材料具有更好的适用性.高胎压较低胎压条件下,E22, E33 和 E23 分别增大 15.2%,16.4%和 15.8%,说明高胎压对环氧沥青道面和 SMA 沥青道面的影响规律一致,影响程度非常接近.

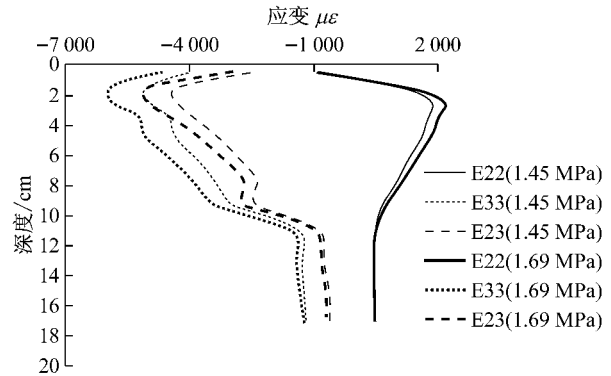


图 10 SMA 道面临界应变竖向分布
Fig.10 In-depth distributions of critical strains with SMA

4 结论与展望

主要结论如下:

(1)机场沥青混凝土道面结构动力响应分析中有必要考虑竖向接触应力的不均匀分布,特别是在新一代飞机高胎压条件下,轮胎-道面接触应力不均匀分布带来的影响不能忽略.

(2)对于不同温度场和面层材料,胎压增大均导致弯拉应变、剪应变和压应变有不同程度的增大,即高胎压加剧了道面的疲劳开裂、top-down 开裂和辙槽发展,加速道面性能衰变.

(3)SMA 做上面层时,较环氧沥青,应变峰值出现位置上移且应变值增大 20%以上,因而环氧沥青铺装材料可以更好的防止道面产生辙槽和“top-down”裂缝.

(4)环氧沥青道面上面层模量大、中下面层模量

小的典型道面结构组合,使得荷载反复作用下中面层和下面层易发生塑性变形的累积,而环氧沥青层层底则易产生弯拉疲劳开裂.因此,建议将环氧沥青层层底的弯拉疲劳开裂和中下面层的塑性变形纳入设计指标.

本文研究成果有助于明确新一代飞机高胎压条件下环氧沥青道面结构动力响应及性能衰变规律,有益于其在机场场道工程中的进一步应用.然而,分析中并未考虑面层材料的粘弹性及起落架的多伦叠加效应,也未就层间接触条件、层厚、轮胎类型和荷载级位等因素对道面结构响应的影响展开分析.

参考文献:

- [1] Al-Qadi I L, Elseifi M A, Yoo P J. Characterization of pavement damage due to different tire configurations [J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2005, 174: 921.
- [2] Tielking J T, Roberts F L. Tire contact pressure and its effect on pavement strain[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1987, 113(1): 56.
- [3] 董泽蛟,曹丽萍,谭忆秋,等.移动荷载作用下沥青路面三向应变动力响应模拟分析[J].*土木工程学报*,2009,42(4):133.
DONG Zejiao, CAO Liping, TAN Yiqiu, *et al.* Analysis of the dynamic response of three directional strains in asphalt pavement under moving vehicle loads [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(4): 133.
- [4] Machedehl R, Wang F, Prozzi J. Analytical study of effects of truck tire pressure on pavements with measured tire-pavement contact stress data[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2005,1919: 111.
- [5] Howell W E, Perez S E, Vogler W A. Aircraft tire footprint forces[M]. [S.l.]: ASTM International, 1986.
- [6] Tielking J T, Abraham M A. Measurement of truck tire footprint pressures [J]. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1994,1435: 92.
- [7] Daughterty R H. A study of the mechanical properties of modern radial aircraft tires [M]. Hampton: National Aeronautics and Space Administration, 2003.
- [8] Rolland E. Tire pressure test effect on pavement [R]. Toulouse: Airbus High Tire Pressure Workshop, France, 2009.
- [9] Wang H, Li M, Garg N. Simulation of NAPTF high tyre pressure tests with advanced finite element modeling [C]// *Proceedings FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*. Galloway, FAA, 2014: 5-7.
- [10] Fabre C, Balay J M, Lerat P, *et al.* Full-scale aircraft tire pressure tests [C]// *International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. Champaign: Taylor and Francis, 2009: 1405-1413.
- [11] Wang H, Al-Qadi I. Combined effect of moving wheel loading and three-dimensional contact stresses on perpetual pavement responses[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2009,2095: 53.
- [12] Virkler M R, Elayadath S. Pedestrian speed-flow-density relationships[M]. Washington D C: TRB, 1994.
- [13] 冉武平,凌建明,赵鸿铎.环氧沥青道面高温足尺加速加载动力响应[J].*同济大学学报:自然科学版*,2015,43(12):1823.
LAN Wuping, LING Jianming, ZHAO Hongduo. Acceleration load dynamic response of full-scale epoxy asphalt pavement under the condition of high temperature[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2015, 43(12):1823.
- [14] Applied Research Associates, Inc., ERES Division. Finite element procedures for flexible pavement analysis[C/CD]. // *Transportation Research Board 83rd Annual Meeting*, Washington D C: TRB, 2004.
- [15] Bathe K J. Finite element procedures [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006.
- [16] Organisation for Economic Co-operation and Development. Dynamic loading of pavements[R]. Paris:[s.n.], 1992.
- [17] Chopra A K. Dynamics of structures[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995.
- [18] 王旭东. 沥青路面材料动力特性与动态参数的研究[D]. 南京:东南大学,1998.
WANG Xudong. Dynamic characteristics and parameters for asphalt pavement[D]. Nanjing: Southeast University, 1998.
- [19] Zhong X G, Zeng X, Rose J G. Shear modulus and damping ratio of rubber-modified asphalt mixes and unsaturated subgrade soils[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, 14(6): 496.
- [20] 廖公云,黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用 [M]. 南京:东南大学出版社,2008.
LIAO Gongyun, HUANG Xiaoming. The application of ABAQUS to road engineering[M]. Nanjing: Press of Southeast University, 2008.
- [21] De Beer M, Fisher C, Jooste F J. Determination of pneumatic tyre/pavement interface contact stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers[C]// *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*. Washington D C: Danish de Road Institute, 1997: 10-14.
- [22] 交通运输部公路科学研究院. JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
Research INstitute of Highway Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG E20—2011 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [23] 姚连军,李丽.基于抗压回弹模量和动态模量的沥青路面设计参数研究[J].*公路交通技术*,2014(2):20.
YAO Lianjun, LI Li. Research on design parameters of asphalt pavement based on compressive modulus of resilience and dynamic modulus[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2014(2):20.