

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.05.003

# 大飞机荷载作用下机场刚性道面力学 响应分析及试验研究

蔡靖<sup>1</sup>, 岳宗保<sup>2</sup>, 都志强<sup>1</sup>

(1. 中国民航大学机场学院, 天津 300300; 2. 郑州通用航空试验区管理委员会, 河南 郑州 450100)

**摘要:**以 A380 为研究机型, 基于 ANSYS 有限元软件, 建立真实尺寸九块板刚性道面模型, 分析大飞机移动荷载作用下道面板的竖向位移响应, 进一步考虑滑行速度、板厚、地基模量等参数对同一点不同时间的位移影响规律, 获得了不同参数对道面板位移响应的影响关系式, 得出飞机滑行速度对道面竖向位移影响较大; 进一步设计缩尺模型试验, 采用多次反复加载模拟 A380 和 B737 飞机荷载对道面板的反复作用, 得到了大型飞机模拟荷载和中型飞机模拟荷载作用下道面板的竖向位移分布和应力分布情况。研究结果表明: 大飞机荷载作用下, 位移最不利位置发生在板角, 应力最不利位置在板边和板角; 大飞机荷载效应比中型荷载作用效应有大幅增加, 在道面设计和维修中大飞机荷载效应增量不容忽视。

**关键词:** 道路工程; 刚性道面; 模型试验; 竖向位移和应力; 大飞机

中图分类号: U416.222

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)05-0014-07

## Analysis and Experimental Study on Mechanical Response of Airport Rigid Pavement under Giant Airplane Loading

CAI Jing<sup>1</sup>, YUE Zong-bao<sup>2</sup>, DU Zhi-qiang<sup>1</sup>

(1. School of Airport, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Zhengzhou General Aviation Pilot Zone Management Committee, Zhengzhou Henan 450100, China)

**Abstract:** Based on ANSYS finite element software, taking the A380 airplane as research object, the full size model of 9 rigid pavement slabs is established for analyzing the vertical displacement response of the slabs under giant airplane load. Some parameters such as taxiing speed, slab thickness and subgrade modulus are considered in studying the displacement of one point at the slab in different time. The relations between above three parameters and the displacements of the slab are obtained, the result shows that the taxiing speed has a larger effect on the vertical displacement of the slab. Further, the reduced scale model experiment is designed, in which the multiple repetitive loads of A380 airplane and B737 airplane on the slab are simulated respectively, and the distributions of vertical displacement and stress of the slab under giant and medium-sized aircraft simulation loads are obtained. The result shows that (1) the most adverse position of vertical displacement is happened at slab corner, and that of stress is happened at slab edge and corner; (2) the load effect of giant airplane is more than that of medium-sized one which cannot be ignored in the pavement design and maintenance.

**Key words:** road engineering; rigid pavement; model experiment; vertical displacement and stress; giant airplane

收稿日期: 2014-09-04

基金项目: 中国民航大学中央高校基金项目(3122014C013); 天津市科技支撑计划重点项目(14ZCZDGX00001)

作者简介: 蔡靖(1975-), 女, 河北滦县人, 副教授. (jcjai@cauc.edu.cn)

## 0 引言

机场道面作为供飞机起飞、着陆滑跑、进行飞行前准备和维护保养的场地,其质量的好坏直接影响飞机的飞行安全。近几十年来,飞机的最大起飞质量和轮胎压力提高很快,伴随着飞机 B787、A380 的使用,这些超大飞机对机场道面提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。而且随着 A380、B787 等超大飞机在我国的投入使用,我国机场刚性道面出现了许多用静力学无法解释的破坏现象,如疲劳开裂和材料松散等,若不能阐明这些破坏机理,将会给道面结构的设计、施工、养护和改建工作带来很大的盲目性,为了能够更科学地设计机场刚性道面,保证飞行安全,有必要对大飞机作用下,刚性道面的力学行为进行理论分析和试验研究,保证道面使用寿命和安全运行。

目前国内外学者大多通过有限元研究弹性地基道面板问题。Mocaviff 等把刚性道面简化为单自由度的振动系统,求得了道面板在动力荷载下的响应<sup>[2]</sup>。Anaut 等通过模态分析方法处理了机场不连续混凝土道面板在冲击荷载作用下的动力响应<sup>[3-4]</sup>。郑小平、王尚文通过设定板的振型函数为梁函数,满足了自由边界条件,用振型叠加法得到弹性地基上的矩形板在运动荷载下的动力响应<sup>[5-6]</sup>。王虎、曲庆璋利用振型分解法得到了黏弹性地基上矩形板受运动荷载的动力响应<sup>[7]</sup>。但以上研究均是针对小型飞机荷载或车辆荷载作用下道面的响应问题,没有针对大型飞机作用下道面的响应问题进行探讨研究。

因此本文以 A380 为研究机型,基于 ANSYS 有限元软件进行了多因素影响下道面板力学响应特性分析,进一步设计模型试验,采用多次加载模拟飞机荷载的反复作用,得到了飞机荷载作用下道面板的竖向位移分布和应力分布情况,以指导刚性道面设计、施工和维护工作,提高其使用寿命。

## 1 有限元力学分析模型的建立

### 1.1 道面与地基模型

建立 9 块足尺寸为 4.5 m × 5 m,厚度分别为 0.32, 0.36, 0.40 m, 3 种不同板厚的道面结构模型,见图 1。采用 Winkler 地基模型<sup>[8-9]</sup>,该模型将道面基层和土基简化为综合弹簧,反应为地基综合模量。面层使用 solid186 单元进行模拟,接缝处传力杆和土基用 combine14 单元进行模拟。分析中取两种地基综合反应模量  $K_1 = 70 \text{ MN/m}^3$ ,  $K_2 = 80 \text{ MN/m}^3$ 。

模型具体参数如表 1 所示。

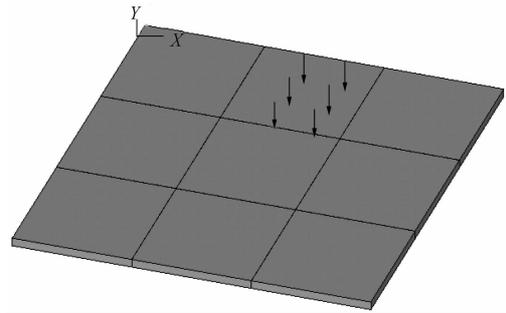


图 1 道面板与轮载分析模型

Fig. 1 Analysis model of pavement slab and wheel load

表 1 模型参数

Tab. 1 Parameters of model

道面结构层	参数	数值
水泥混凝土面层	弯拉强度/MPa	5
	弯拉弹性模量/MPa	36 000
	泊松比	0.15
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 400
	厚度/m	0.32/0.36/0.4
地基	地基反应模量/( $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	70/80

### 1.2 飞机荷载参数

以 A380 机型为超大型飞机的代表形式,主起落架形式为三轴双轮如图 2 所示,具体参数如表 2 所示<sup>[10]</sup>。飞机荷载为移动荷载,而且荷载必须施加在节点上,从而对机轮荷载进行简化。每个机轮荷载简化为移动的集中荷载(见图 1),为模拟飞机滑行提供方便。考虑接缝和周边板对其的约束作用,以中间板为主要研究对象,在飞机移动荷载作用下研究该道面板的最大应力和最大位移,并进一步考虑速度、板厚、地基模量等参数对同一点不同时间内的位移影响规律。

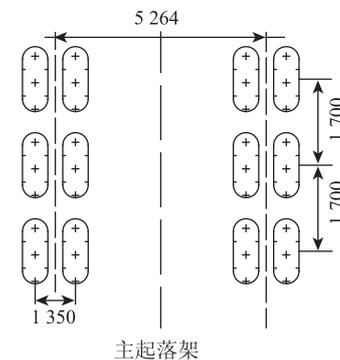


图 2 A380 主起落架形式 (单位: mm)

Fig. 2 Main landing gear of airplane A380 (unit: mm)

表2 A380 客机荷载参数  
Tab.2 Loading parameters of airplane A380

机型	A380	机型	A380
最大起飞质量/kN	5 540	胎压 $p$ /MPa	1.47
主起落架个数 $n_c$	4	轮印面积/m <sup>2</sup>	0.178
轮子数 $n_w$	20	轮印长度/mm	508.6
主起落架分配系数 $p$	0.95	轮印宽度/mm	350.3
主起落架单轮荷载 $p_s$ /kN	261.91		

## 2 大飞机荷载作用下道面板的力学响应分析

设计中影响道面板力学响应的因素主要有道面板厚度、飞机行驶速度和地基综合反应模量。因此针对以上3种因素进行分析,试图找出更科学的指导道面板设计的理论。

### 2.1 飞机滑行动力学分析

当飞机在理想光滑且水平的机场道面上滑行时,飞机受重力、升力及道面反力作用<sup>[11]</sup>。道面反力即飞机荷载为:

$$P_v = G - R_y, \quad (1)$$

$$R_y = C_y \rho S \frac{v^2}{2},$$

式中,  $R_y$  为升力;  $G$  为飞机重力;  $v$  为飞机滑行速度;  $\rho$  为空气密度;  $C_y$  为升力系数;  $S$  为升力面积。考虑到飞机离地时重力与空气升力相等,有  $G = C_y \rho S \cdot \frac{v_0^2}{2}$ 。其中  $v_0$  是离地速度。所以:

$$P_v = G - R_y = G(1 - \bar{v}^2), \quad (2)$$

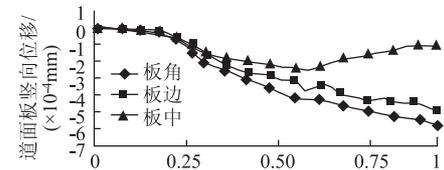
式中,  $\bar{v}$  为速度比;  $\bar{v} = \frac{v}{v_0}$ 。

飞机最大起飞质量是飞机满载起飞前质量,由于降落时飞机油耗等其他原因,飞机的总质量会小于出航起飞前,所以考虑飞机为移动荷载时,飞机由静止到起飞,速度经历了由无到有的变化,A380起飞速度  $v_0$  约为 80 m/s。根据文献 [11],飞机低速滑行阶段,由于速度低,升力系数小,可以忽略不计;但当速度大于 15 m/s 时,飞机滑跑产生的升力较大,致使飞机对道面荷载减小,所以在分析中将速度上限取为 20 m/s。将飞机起飞滑跑低速过程分为多段匀速运动过程进行分析,得出飞机低速滑行速度对道面结构响应的规律。

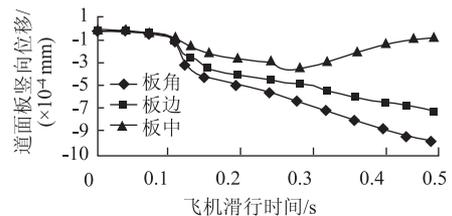
### 2.2 飞机滑行速度对道面板位移响应影响分析

选取飞机滑行路线为板中线,中间板板角、板边和板中竖向位移为纵坐标,飞机滑行时间为横坐标。板厚为 0.32 m,地基综合模量  $K_1 = 70 \text{ MN/m}^3$ 。

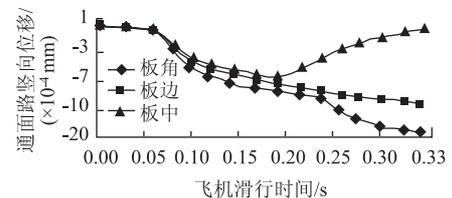
以 80 m/s 的起飞速度为标准,考虑到飞机速度大于 15 m/s 时,飞机所受的升力将会迅速增大,对道面板的影响将会减小,故选取飞机速度从 1 m/s 到  $v = 15 \text{ m/s}$ ,即速度比为 1%, 2%, 19%。得到板角、板边、板中三位置在飞机以不同速度滑行时的竖向位移响应曲线。图 3 给出了飞机滑行速度比为 5%, 10% 和 19% 时的竖向位移响应曲线,进而得出道面板最大位移与滑行速度关系曲线如图 4 所示。



(a) 5%速度比



(b) 10%速度比



(c) 19%速度比

图3 不同飞机滑行速度下道面板竖向位移

Fig.3 Vertical displacements of slab at different taxiing velocities of airplane

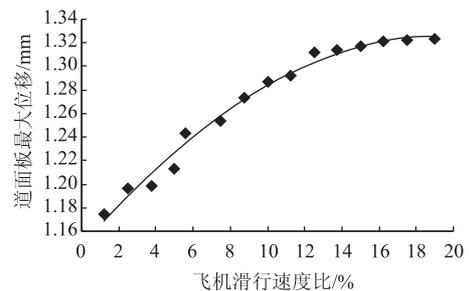


图4 道面板最大位移随速度变化曲线

Fig.4 Curve of maximum vertical displacement of slab varying with taxiing velocity

由图3可看出,在相同荷载作用条件下,道面板最大竖向位移出现在板角,且随飞机滑行速度增加,道面板最大竖向位移增加。

将最大位移  $\delta_{\max}$  曲线用多项式拟合, 得到最大动位移  $\delta_{\max}$  与飞机滑行速度比  $v/\bar{v}$  的关系为:

$$\delta_{\max} = -0.5 \times 10^{-3} v^2/\bar{v} + 0.02 v/\bar{v} + 1.15, \quad (3)$$

式中,  $\delta_{\max}$  为板角最大位移;  $\bar{v}$  为起飞速度, 取 80 m/s;  $v$  为飞机滑行速度;  $v/\bar{v}$  为飞机滑行速度比。

由图 3 和图 4 可以看出飞机滑行速度比为 19% 时, 道面板最大位移为 1.323 mm, 与静止飞机荷载作用<sup>[12]</sup> 相比最大位移增加了 15%, 与中型飞机荷载作用相比最大位移增加了 40% 左右, 由此可见大飞机的移动荷载效应不容忽视。

### 2.3 道面板厚度对位移响应影响分析

随着道面板厚度的增加, 道面板在受到飞机荷载作用下的最大位移发生变化, 为了研究道面板厚度对道面板动力响应的影响, 选取板厚 0.3, 0.31, 0.32 ~ 0.5 m, 飞机滑行速度 15 m/s, 地基刚度  $K_1 = 70 \text{ MN/m}^3$ 。由有限元模型计算出中间板板边、板角和板中的竖向位移响应曲线如图 5 所示, 进而分析得出道面板最大竖向位移随道面板厚度变化曲线如图 6 所示。由图 6 曲线获得道面板最大竖向位移  $\delta_{\max}$  与板厚  $h$  之间的关系为:

$$\delta_{\max} = -1.21h^2 + 0.62h + 1.25, \quad (4)$$

式中  $h$  为道面板厚度。

对比图 5 和图 6 可看出, 在相同荷载作用条件下, 道面板最大竖向位移仍出现在板角, 且板厚增加, 道面板的最大竖向位移略微减小。道面板由 0.3 m 增加到 0.5 m 时, 其最大竖向位移减小 4.5%。因此常规板厚对道面板位移响应影响较小。

### 2.4 地基综合模量的影响

随着地基模量  $K$  的增大, 道面板在受到飞机荷载作用下的最大位移发生变化, 为了研究地基模量  $K$  对道面板动力响应的影响, 选取地基综合模量  $K$  为 70, 75, 80, ..., 150  $\text{MN/m}^3$ , 飞机滑行速度 15 m/s, 板厚选 32 cm, 得出道面板位移响应曲线如图 7 所示, 进而得到不同地基模量下道面板最大竖向位移曲线如图 8 所示。

$$\delta_{\max} = 0.2 \times 10^{-3} K^2 - 0.043K + 3.24, \quad (5)$$

式中  $K$  为地基综合模量。

对比图 7 和图 8 可看出, 在相同荷载作用条件下, 道面板最大竖向位移仍出现在板角, 且随地基综合模量增大, 道面板的最大竖向位移减小较为剧烈, 可见地基综合模量对道面板性能影响较大。

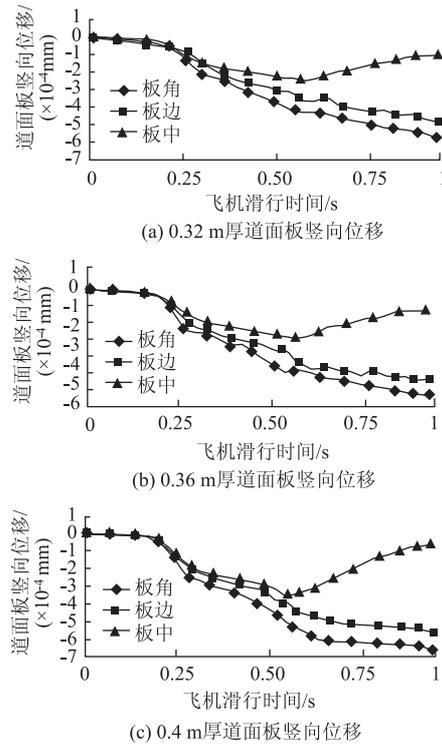


图 5 不同板厚下道面板竖向位移响应曲线  
Fig. 5 Curves of vertical displacement of slab with different thicknesses

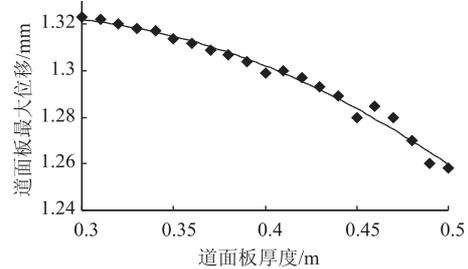


图 6 道面板最大位移随板厚变化曲线  
Fig. 6 Maximum vertical displacement of slab varying with thickness

## 3 刚性道面模型试验

### 3.1 模型设计

为了研究大飞机荷载作用与中型飞机荷载作用的区别, 加载分别模拟 A380 和 B737-200 机型。道面板尺寸一般为 4.5 m × 4.5 m, 板厚范围一般为 0.3 ~ 0.4 m。本文设计的模型试验中道面板尺寸为 1.5 m × 1.5 m, 是实际道面板的 1/3, 考虑周边板对试验板的影响, 设计如图 9 所示的道面板模型。根据有限元分析结果, 因周边板应力影响范围在 1/5 板边长以内, 所以取周边四块板宽度为 0.3 m。板厚取 0.1 m, 为实际板厚的 1/3。模型的缩尺为 1/9,

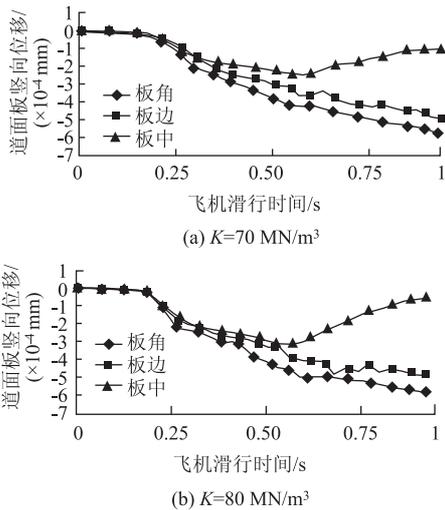


图7 不同地基综合模量下道面板位移响应

Fig.7 Vertical displacement of slab with different subgrade composite moduli

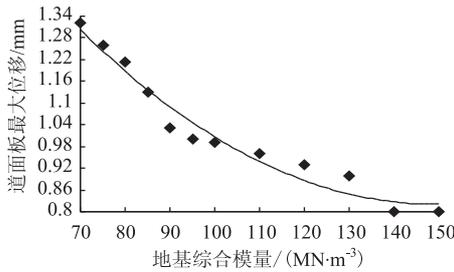


图8 地基综合模量与竖向位移关系

Fig.8 Relation between subgrade composite modulus and vertical displacement

因此模拟飞机荷载分别为 A380 和 B737 单轮荷载的 1/9, 即 29 kN 和 14.7 kN。

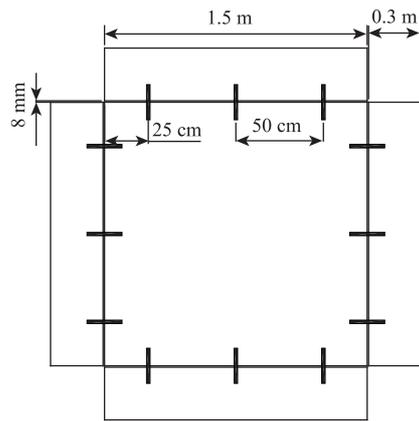


图9 试验用混凝土板

Fig.9 Concert slab for experiment

3.2 加载方案

加载装置选用杠杆加载, 道面板所受到的荷载分配到两个模拟轮印上如图 10 所示, 加载位置分为

中间板的板中。考虑到飞机荷载的作用, 采用多次反复加载的方法。循环加载 20 次, 每次持荷 1 min。在加载的同时, 由板中布置的应变片读数获取每次荷载作用下的应力, 由安装在板面的位移表获得板的竖向位移。图 11 给出了应变测试位置和位移测点位置。

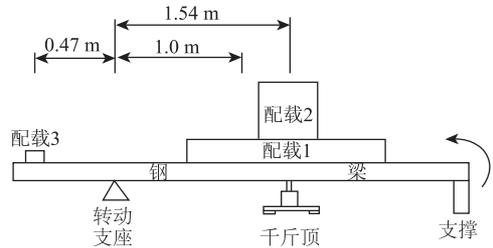


图10 加载装置

Fig.10 Loading device

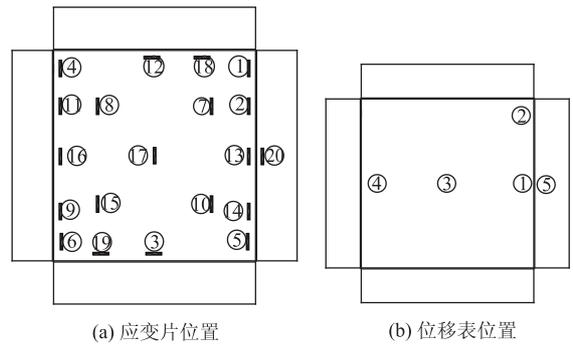


图11 道面板上应变片和位移表的位置

Fig.11 Positions of strain gauges and displacement gauges on slab

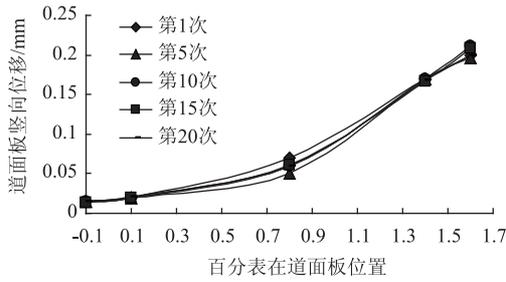
3.3 结果分析

为了便于在图表中表示百分表各点在道面板的位置, 把位移表 5 的横坐标设为 -0.1, 位移表 1 横坐标设为 0.1, 板中的位移表 3 横坐标为 0.8, 位移表 4 为 1.4, 板角的位移表 2 横坐标为 1.6。图 12 为道面板在不同荷载条件下的板顶竖向位移曲线。

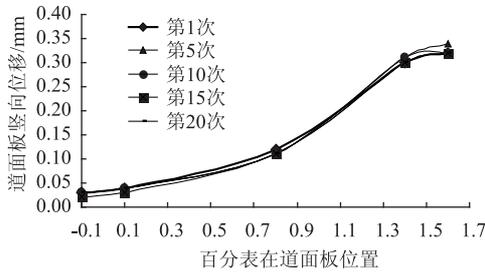
对比图 12 (a)、(b) 和 (c) 可得到 A380 飞机荷载作用下道面板整体的最大竖向位移明显大于 B737 飞机荷载作用下的道面板竖向位移。B737 飞机荷载作用下, 道面板最大竖向位移为 0.8 mm, A380 飞机荷载作用下, 道面板板顶的最大竖向位移达到了 1.2 mm, 增大了 50%。因此, 考虑以 A380 飞机作为当量机型对道面板进行设计具有前瞻性。

3.4 道面板板底应力

为了分析道面板的受荷情况, 本文选取了对角线、板中两条作用线分析道面板的应力分布情况。两条作用线的示意图如图 13 所示。



(a) 道面板在B737荷载作用下的竖向位移



(b) 道面板在A380荷载作用下的竖向位移

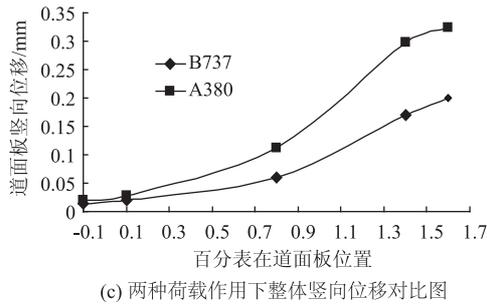


图 12 道面板在两种荷载作用下竖向位移

Fig. 12 Vertical displacements of slab under two loads

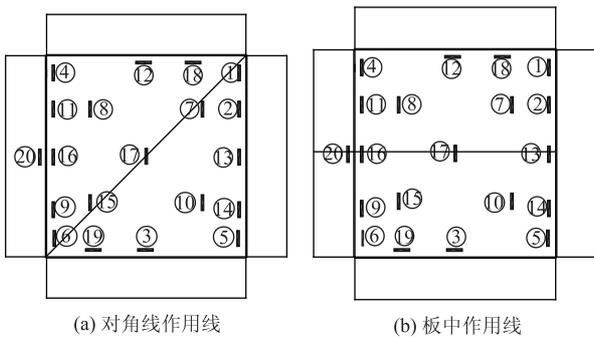
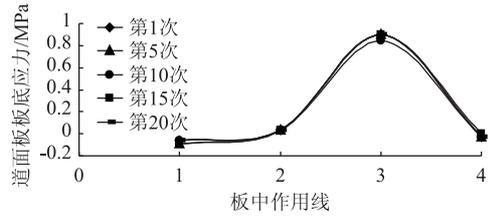


图 13 作用线示意图

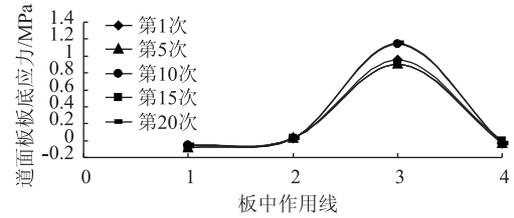
Fig. 13 Loading lines

为了更直观地表达, 将应变片从右向左进行编号, 对于板中作用线 13 号为 1, 17 号为 2, 16 号为 3, 20 号为 4; 对角线作用线坐标轴 1~5 分别对应 1, 7, 17, 15, 6 号应变片。按照作用线位置给出道面板在飞机荷载作用下的板底应力分布曲线, 如图 14 和图 15 所示。

由板中作用线道面板的应力分布图 14 可得到, 两种荷载作用下板边位置出现最大应力, B737 产生



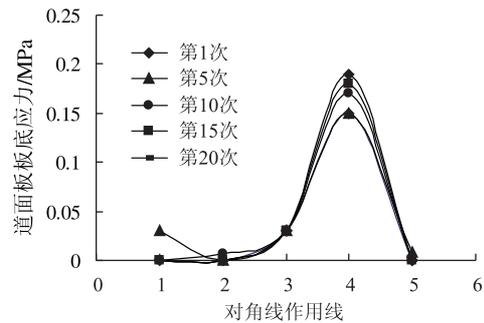
(a) 道面板在B737荷载作用下应力分布



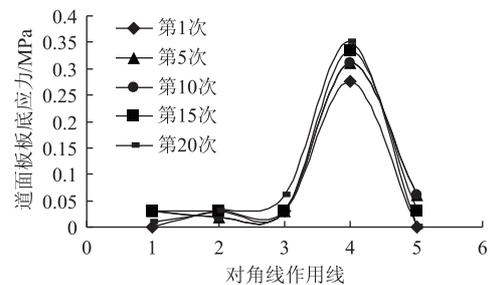
(b) 道面板在A380荷载作用下应力分布

图 14 道面板板中应力分布

Fig. 14 Stress distribution in middle of slab



(a) 道面板在B737荷载作用下应力分布



(b) 道面板在A380荷载作用下应力分布

图 15 道面板对角线应力分布

Fig. 15 Stress distribution on diagonal line of slab

的板中作用线最大板底应力 0.85 MPa, A380 飞机荷载对道面板板中作用线产生的最大板底应力 1.2 MPa, 比 B737 作用下增大了 41%。由图 15 对角线作用线道面板应力分布可知, 模拟 A380 飞机荷载对道面板产生的最大板底应力 0.35 MPa 要大于模拟 B737 荷载产生的最大板底应力 0.19 MPa, 最大板底应力增大了 84%。

#### 4 结论

(1) 道面板的最大竖向位移出现在板角位置,

最大应力出现在板边和板角位置。

(2) 大飞机滑行速度对道面板位移响应影响较大,板厚和地基综合模量影响较小。大飞机荷载效应不容忽视。

(3) 通过模拟 A380 和 B737 两种加载模式得到道面板的板竖向位移和板底应力,在模型试验中 A380 飞机荷载对道面板产生的最大板底应力 1.2 MPa, B737 飞机荷载产生的最大板底应力 0.85 MPa,最大板底应力增大了 41%。

(4) A380 飞机荷载作用在道面板板顶的最大竖向位移达到了 1.2 mm, B737 飞机荷载作用下,道面板最大竖向位移为 0.8 mm,板底最大竖向位移增大了 50%。针对试验和分析结果,建议大飞机起降机场道面板厚度取 0.4 m 以上,地基综合模量取  $80 \text{ MN/m}^3$  以上。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 赵鸿铎. 适应大型飞机的沥青道面交通荷载分析方法及参数的研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.  
ZHAO Hong-duo. Study on Traffic Load Analysis Method and Parameters of Asphalt Pavement Suitable for Large Aircraft [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [2] MCCAIVITT N, YATES M R, FORDE M C. Dynamic Stiffness Analysis of Concrete Pavement Slabs [J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 118 (4): 540 - 556.
- [3] KUKRETI A R, TAHERI M R, LEDESMA R H. Dynamic Analysis of Rigid Airport Pavements with Discontinuities [J]. Journal of Transportation Engineering, 1992, 118 (3): 341 - 360.
- [4] HARDY M S A, CEBON D. Importance of Speed and Frequency in Flexible Pavement Response [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120 (3): 463 - 482.
- [5] 张恒谦, 侯卫. 考虑地基粘弹性的刚性道面板动力响应 [J]. 机械科学与技术, 2009, 28 (11): 1514 - 1516.  
ZHANG Heng-qian, HOU Wei. Dynamic Response of Rigid Pavements on Semi-infinite Viscoelastic Foundation [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28 (11): 1514 - 1516.
- [6] 苏长征. 冲击荷载作用下机场道面的设计、计算理论 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.  
SU Chang-zheng. Design and Computation Theory of Airport Pavement under Impact Load [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [7] 刘锋, 孙明清, 王应军. 基于 GIS 和有限元的机场道面健康监控系统研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (6): 23 - 27.  
LIU Feng, SUN Ming-qing, WANG Ying-jun. Research on Health Monitoring System of Airport Pavement Based on GIS and FEM [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (6): 23 - 27.
- [8] 许金余, 邓子辰. 机场刚性道面动力分析 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.  
XU Jin-yu, DENG Zi-chen. Dynamic Analysis of Airfield Rigid Pavement [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2002.
- [9] 翁兴中, 焦明声. 军用机场水泥混凝土道面结构参数变异性 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (2): 5 - 13.  
WENG Xing-zhong, JIAO Ming-sheng. Variability Analysis of Military Airfield Concrete Pavement Structure Parameters [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (2): 5 - 13.
- [10] MH/T5004—2010, 民用航空运输机场水泥混凝土道面设计规范 [S].  
MH/T5004—2010, Specifications for Airport Concrete Pavement Design [S].
- [11] 陈俊章. 飞机设计手册 (第 8 册重量平衡与控制) [M]. 北京: 航空工业出版社, 1999.  
CHEN Jun-zhang. Airplane Design Handbook (Volume 8: Weight Balance and Control) [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1999.
- [12] CAI Jing, YUE Zong-bao. Study of the Critical Load for Rigid Airport Pavement by the Finite Element Analysis [C] // Applied Mechanics and Materials. Switzerland: Trans Tech Publications, 2012: 1748 - 1753.