

## 水泥混凝土跑道边缘区域力学响应

张献民<sup>1,2</sup> 董倩<sup>1</sup> 吕耀志<sup>3</sup> 薛华鑫<sup>1</sup> 孙志超<sup>1</sup>

(1. 中国民航大学机场学院, 天津, 300300; 2. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016;

3. 天津市市政工程设计研究院, 天津, 300021)

**摘要:**为模拟飞机滑跑时道面的力学响应,实现飞机滑行状态下对跑道承载力的检测,在考虑机场跑道混凝土面板间接缝传荷效应条件下,建立了跑道三维有限元模型。将飞机动荷载作用于跑道,通过计算涵盖实际场道结构的不同结构层强度组合的跑道测试区竖向位移,建立了测试区位移峰值与跑道各层强度的数学模型,揭示了水泥混凝土跑道边缘区域的结构力学响应。计算结果表明:测试区竖向位移峰值与面层厚度近似成线性关系,与面层弹性模量近似成对数关系,与地基回弹模量近似成指数关系,而基层回弹模量与垫层回弹模量对测试区竖向位移影响不显著。

**关键词:**道路工程;刚性道面;边缘区域;有限元;竖向位移;参数敏感性

**中图分类号:**TU8 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2013)05-0693-07

## Mechanical Responses of Edge of Rigid Airport Pavement Under Aircraft Loadings

Zhang Xianmin<sup>1,2</sup>, Dong Qian<sup>1</sup>, Lü Yaozhi<sup>3</sup>, Xue Huaxin<sup>1</sup>, Sun Zhichao<sup>1</sup>

(1. Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

3. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin, 300021, China)

**Abstract:** A three-dimensional finite element model which consists of thirty full-scale slabs is established for analyzing the mechanical responses of cement concrete airport pavement under aircraft dynamic loads and detecting its capacity under aircraft taxiing. And the joint loading-transfer effect between slabs is considered in the model. The mathematical models between displacement peaks in test area and elasticity modulus of each pavement structure layer are built by calculating plenty of vertical displacements which range over different modulus combinations according to actual runway structure. The results show that the peak value of vertical displacement has linear relationship with surface thickness, logarithmic relationship with pavement elastic modulus and exponential relationship with the resilient modulus of foundation. The resilient moduli of base course and bed course influence little on vertical displacements.

**Key words:** road engineering; rigid pavement; edge of pavement; finite element; vertical displacement; parameter sensibility

民航规定必须定期对机场跑道进行检测,以保证飞机的运营安全。传统的跑道承载力无损检测

采用重锤式弯沉仪技术,此方法以落锤冲击来模拟单个机轮荷载对道面的作用力,然而道面结构的应

力变形是多个机轮荷载按照不同的起落架构型作用于道面的结果,由多个机轮荷载的叠加作用产生,落锤冲击荷载不论在力的大小还是在影响深度方面,与真实的飞机荷载相比都不具有可比性。此外,落锤式弯沉仪技术需要飞机停航或在飞机起降间隙进行,对于大型繁忙机场,飞机昼夜起降,停航将带来巨大的经济与社会影响。

针对此问题,笔者提出飞机滑行状态下进行跑道承载力检测的思想。通过在不影响飞机起降的道面板边缘区域布设高精度传感器,采集飞机滑行过程中跑道边缘的动位移,以实测的动位移反演跑道各结构层强度,从而实现飞机滑行过程中跑道承载力的检测。为实现上述检测技术,必须针对可涵盖实际场道结构的力学模型,进行大量正演计算,形成可供实际测试结果快速反演的数学模型。有限元法因其能模拟水泥混凝土面层真实的受力状况,克服传统道面设计与受力分析中的不足而得到了国内外学者的广泛关注与运用<sup>[1-4]</sup>。本文借助有限元软件,从跑道实际结构形式出发,考虑跑道混凝土面板间接缝传荷效应,建立了足尺30块板的三维有限元模型。使用典型机型作用于道面不同位置,计算了测试区(距机轮外边缘9~14 m区域)内道面的竖向位移,分析了荷载作用位置对测试区竖向位移的影响,并研究了测试区位移对跑道各结构层强度参数的敏感性,建立了相关数学模型。研究成果为跑道的优化设计与飞机滑行状态下跑道承载力检测评估提供理论依据和参考。

## 1 道面结构有限元模型

### 1.1 几何参数

以某机场跑道的实际参数建立有限元模型。水泥混凝土道面单块板尺寸为 $5\text{ m} \times 4.5\text{ m} \times 0.34\text{ m}$ 。飞机前起落架荷载仅占全部荷载的5%左右,计算表明,全部荷载作用与只作用主起落架荷载两种工况下,本研究区域的竖向位移最大相差0.6%。因此,可不考虑前起落架荷载对本文研究区域竖向位移的影响。飞机滑跑方向上,主起落架荷载对道面应力位移的显著影响范围为15 m,横断面方向取整个跑道宽度45 m,故道面有限元模型平面尺寸为 $15\text{ m} \times 45\text{ m}$ ,即足尺30块板,如图1所示。

道面面层、基层、垫层及土基之间完全连续接触,接触面上各节点具有相同的自由度,协调变形。 $X$ 表示垂直于飞机滑行方向, $Z$ 表示滑行方向, $Y$ 表示道面结构垂直方向。整个道面的边界条件为

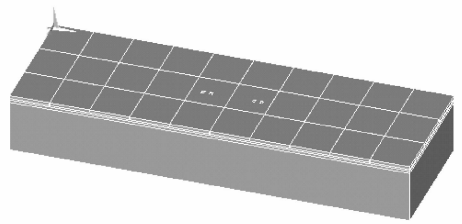


图1 水泥混凝土道面有限元模型

垂直滑行方向的边界, $X, Y, Z$ 方向位移为零,平行于滑行方向的边界, $X$ 方向位移为零。土基底面 $X, Y, Z$ 方向位移为零,如图2所示。



图2 约束施加

### 1.2 材料参数

水泥混凝土道面各层均建立实体,以弹性模量 $E$ 及泊松比 $\mu$ 表征其强度,如表1所示。弹性层状体系假设土基在厚度方向上无限延伸,但模型建立时要求土基厚度确定,相关资料表明<sup>[5]</sup>,附加应力与自重应力的比值 $\leq 5\%$ 后,附加应力变化缓慢,可认为其收敛于5%附近。因此,将附加应力与自重应力的比值等于5%作为土基厚度的确定标准,计算后土基深度取8 m。

表1 道面结构和材料参数

道面结构层	力学参数	数值
水泥混凝土面层	弯拉强度/MPa	4.5
	弹性模量 $E_1$ /MPa	36 000
	泊松比	0.15
	厚度 $h_1$ /m	0.34
水泥稳定碎石基层	回弹模量 $E_2$ /MPa	1 500
	泊松比	0.25
	厚度 $h_2$ /m	0.20
	回弹模量 $E_3$ /MPa	200
砂砾垫层	泊松比	0.30
	厚度 $h_3$ /m	0.30
	回弹模量 $E_4$ /MPa	30
土基	泊松比	0.35
	厚度 $h_4$ /m	8.00

### 1.3 道面结构单元类型与网格密度

采用二次单元可以在粗划网格( $h/e=2, h$ 为各结构层厚度; $e$ 为单元尺寸)的情况下得到较高精度的计算结果,是有限元建模中理想的单元类

型<sup>[6]</sup>。因此,选用二次六面体单元,面层网格尺寸为 $0.15\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.17\text{ m}$ ,荷载作用区域网格局部细化,尺寸为 $0.1\text{ m}\times 0.1\text{ m}\times 0.17\text{ m}$ 。基层、垫层、土基网格尺寸确定时亦参照上述原则,分别为 $0.15\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ , $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ , $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 。水泥混凝土面板间传力杆接缝宽度为 $4\text{ mm}$ ,以弹簧单元模拟接缝的剪力传递作用,弹簧刚度的大小则表示接缝传荷能力的强弱,见图3。弹簧刚度采用“分配面积法”<sup>[6-7]</sup>计算,结合实际道面的接缝形式、传力杆材料、布置等计算所得弹簧刚度如表2所示。

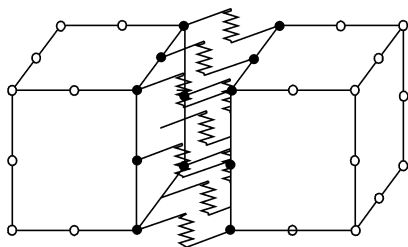


图3 接缝间弹簧布置图

表2 接缝弹簧刚度表

弹簧位置	横缝弹簧刚度/ ( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	纵缝弹簧刚度/ ( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )
板角	28.1	37.4
板边	56.2	74.9
板中	112.4	149.8

#### 1.4 飞机动荷载

飞机滑行状态下进行道面边缘区域内应力场与位移场分析的关键问题之一是确定飞机滑行过程中对道面的动力作用。飞机动荷载与滑行速度、道面平整度以及机翼产生的升力等因素有关,基于公路工程中,动荷载系数的研究成果<sup>[8]</sup>,文献<sup>[9]</sup>建立了基于国际平整度指数  $IRI$  的飞机动荷载系数模型

$$K' = 1 + 11.5c_0 IRI \sqrt{v} - \frac{1 + 11.5c_0 IRI \sqrt{v_0}}{v_0^2} v^2 \quad (1)$$

式中: $c_0 = 10^{-3}\text{ m}^{-0.5}\text{ s}^{0.5}$ ;  $v$  为飞机滑跑速度;  $v_0$  为飞机离地时的瞬时速度;  $K'$  为飞机的动荷载系数。

飞机动荷载则可用式(2)表示

$$F = K'G \quad (2)$$

式中: $F$  为飞机动荷载;  $G$  为飞机重力。

假设  $IRI$  为 4.7, 飞机起飞离地速度为  $75.0\text{ m/s}$ , 绘制出 B737-800 动荷载系数随滑跑步度的变化曲线(图4)。从图中可以看出,滑跑速度

为 0 时,动荷载系数取值为 1,即飞机处于静止状态,对道面的冲击荷载等于静荷载;随着滑跑速度的增加,冲击荷载不断增加,因为此时的滑跑速度较小,机翼所提供的升力较小,所以总体看来动荷载系数还处于增加阶段;当滑跑速度达到  $13.9\text{ m/s}$  后,动荷载系数达到最大值 1.15,滑跑速度再增大,由于机翼提供的升力大幅增加,动荷载系数将不断减小,直到飞机达到起飞速度离开地面,此时动荷载系数为 0,即飞机不再与地面发生接触。

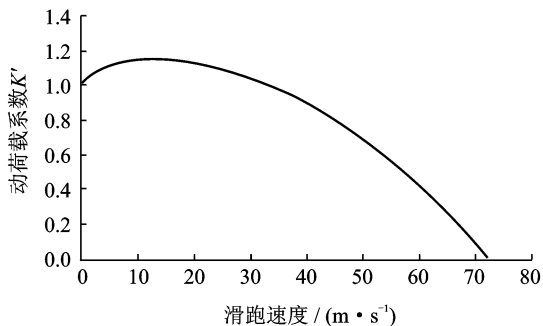


图4  $IRI=4.7$  时 B737-800 动荷载系数变化曲线

将 B737-800 静荷载乘以最大动荷载系数 1.15 转换为动荷载后作用于有限元模型,飞机动荷载及相关参数<sup>[10]</sup>如表3所示。飞机的轮印面积等效为矩形,由于水泥混凝土道面存在纵横接缝和传荷装置,整个主起落架荷载对道面结构的影响不能简单地将其中一个主起落架的计算结果进行位移叠加<sup>[2]</sup>,因此本文以机型 B737-800 整个主起落架作用于道面。

表3 B737-800 相关荷载参数

参数	参数值
最大飞机动荷载/kN	790.04
主起落架荷载分配系数	0.95
主起落架间距/m	5.72
主起落架个数	2
主起落架轮距/m	0.86
主起落架构型	单轴双轮
胎压/MPa	1.47
轮印面积/ $\text{m}^2$	0.13
轮印长度/m	0.43
轮印宽度/m	0.30

## 2 道面结构的力学响应分析

### 2.1 模型精确性验证

首先按照上述网格划分与约束施加方式建立无接缝装置的一整块板( $15\text{ m}\times 45\text{ m}\times 8\text{ m}$ )有限元模型,计算竖向位移。将土基、垫层、基层的回弹

模量进行折算转换为基顶回弹模量<sup>[11]</sup>,按照弹性半空间地基上水泥混凝土板竖向位移的计算公式<sup>[12]</sup>计算解析解。对比有限元计算结果及解析解,以此验证模型约束及网格划分是否合理。

按照表1中相关参数进行折算后,基顶回弹模量为130 MPa,泊松比为0.3。当总荷载为95 kN时,对比结果见表4,两种计算方法的误差在不同距离处均在10%以内。因此,网格划分及约束施加均较合理。

确定网格及约束条件后,建立带有接缝装置的有限元模型,检验弹簧单元的传力效果。计算表明,接缝挠度传荷系数<sup>[13]</sup>均在90%左右,接缝传荷能力良好。

表4 道面竖向位移解析解与有限元模型计算结果对比( $R=0.15\text{ m}$ 的圆形均布荷载)

距荷载圆心/m	0.00	1.20	2.40	3.60
有限元计算解/ $\mu\text{m}$	-208.54	-151.56	-99.19	-65.25
解析解/ $\mu\text{m}$	-213.88	-162.50	-106.10	-69.24
误差/%	2.50	6.73	6.51	5.76
距离荷载圆心/m	7.20	12.00	13.05	13.80
有限元计算解/ $\mu\text{m}$	-27.92	-16.23	8.76	16.35
解析解/ $\mu\text{m}$	-29.60	-17.87	9.10	17.95
误差/%	5.66	9.18	3.76	8.90

## 2.2 研究区域的选择

对B737-800飞机动荷载作用下,跑道全宽度范围内的位移场进行研究,最终确定距主起落架右侧轮胎9~14 m的区域为布置传感器的区域,即测试区。因为此区域距离飞机较远,可充分保证飞机滑行安全,并且随道面结构的变化,此区域内的位移大小可满足传感器测试的精度要求。研究区域如图5所示。

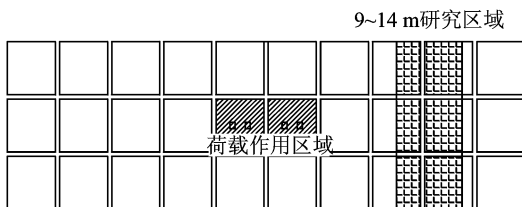


图5 研究区域位置

## 2.3 不同荷载作用位置力学响应分析

分别计算B737-800作用于板中、纵缝边缘中部、横缝边缘中部和板角4种不同位置时(图6),道面全宽度的竖向位移,如图7所示。计算结果表明:荷载作用位置不同时,测试区的位移曲线几乎

重合,距机轮外侧相同距离处跑道位移基本不变。因此,机轮作用位置对测试区位移的影响可忽略不计。

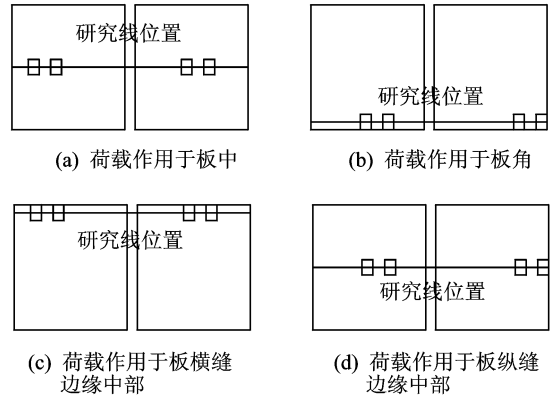
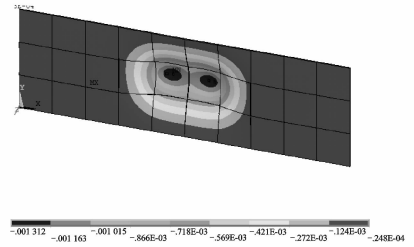
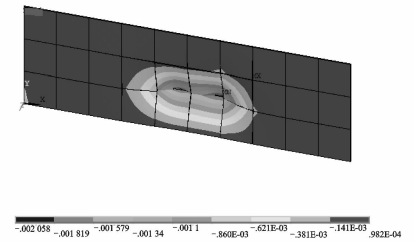


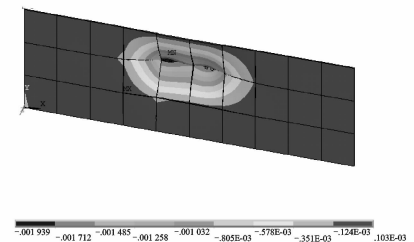
图6 机轮作用位置



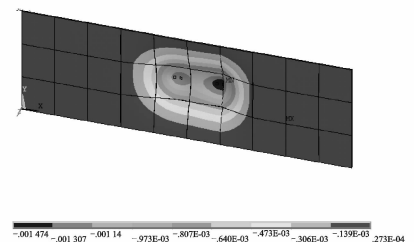
(a) 荷载作用于板中



(b) 荷载作用于板角



(c) 荷载作用于横缝边缘



(d) 荷载作用于纵缝边缘

图7 道面板竖向位移云图

### 3 道面结构的参数敏感性分析

以下进行测试区内跑道竖向位移与各结构层强度的正演计算,建立相关数学模型,分析跑道测试区竖向位移对各结构层参数的敏感性。

#### 3.1 面层厚度 $h_1$

随道面厚度的增加,测试区竖向位移整体减小,位移曲线变化趋势一致,如图 8 所示。距离机轮外边缘 11 m 处,位移曲线出现拐点,这是因为存在接缝装置,致使跨接缝后相邻道面板上的位移有所降低。

从图 8 中可看出,距离机轮外边缘 9 m 处的位移与距离机轮外边缘 11 m 处的位移相比反而较小,这是因为荷载作用区受压,测试区受拉,由受压区向受拉区过渡时,受拉区的位移先增大后减小,经过此区域后,跑道的位移随荷载距离的增大而减小。

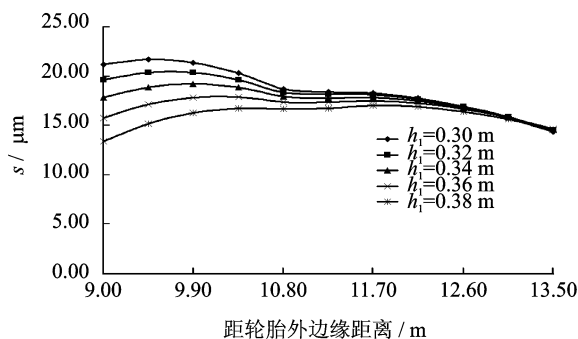


图 8 不同面层厚度  $h_1$  竖向位移曲线

其他各参数相同时,厚度大的道面具有较强承载能力,因此相同荷载作用下,测试区内道面产生较小竖向位移。随距离的增大,道面厚度对该区域内竖向位移的影响逐渐减小,距轮胎外边缘 12 m 后的区域,不同道面厚度的位移曲线几乎重合,因为该区域距荷载作用位置较远,此处的位移主要由地基的变形引起,基本不受面层厚度的影响。

道面厚度由 0.28 m 增大到 0.38 m,测试区的竖向位移峰值由 22  $\mu\text{m}$  减小至 15  $\mu\text{m}$ ,减幅达 32%,道面厚度的变化对位移影响显著,是决定道面强度的关键因素。将测试区峰值位移  $s$  与道面厚度  $h_1$  回归分析, $s$  与  $h_1$  成线性规律变化,相关系数为 0.993 1,如图 9 所示。

$$s = -81.045h_1 + 46.219 \quad (3)$$

#### 3.2 面层弹性模量 $E_1$

保持其他参数固定不变,面层弹性模量  $E_1$  增大,测试区竖向位移减小,因增大  $E_1$ ,使整个道面

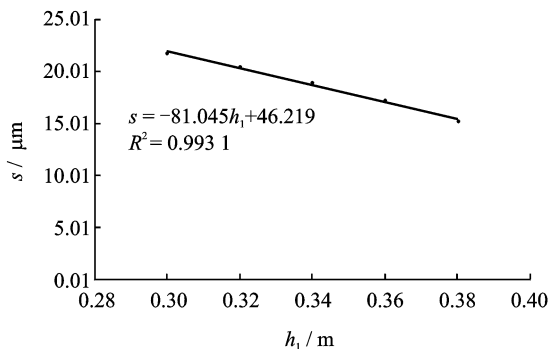


图 9  $s-h_1$  关系曲线

结构刚度增大。各位移曲线变化趋势一致。如图 10 所示。

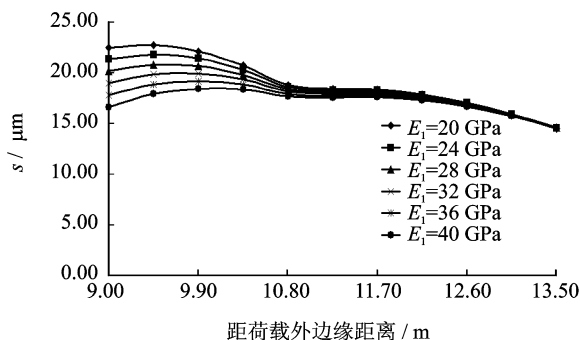


图 10 不同面层刚度  $E_1$  的竖向位移曲线

另外,虽刚度大的道面具有较强荷载扩散能力,但测试区域距荷载作用位置较远,此处位移主要由地基变形引起,荷载扩散引起的面层位移极小,可忽略不计。距飞机轮胎外边缘距离大于 12 m 后,道面竖向位移几乎不受面层模量的影响。

道面弹性模量由 40 GPa 减小至 20 GPa,竖向位移由 18  $\mu\text{m}$  增大至 23  $\mu\text{m}$ ,增幅达 28%。欲使道面达到较高强度,应合理选择道面刚度。将竖向位移  $s$  与面层弹性模量  $E_1$  回归分析得到下述规律,位移随道面刚度呈对数变化,相关系数为 0.988 3,如图 11 所示。

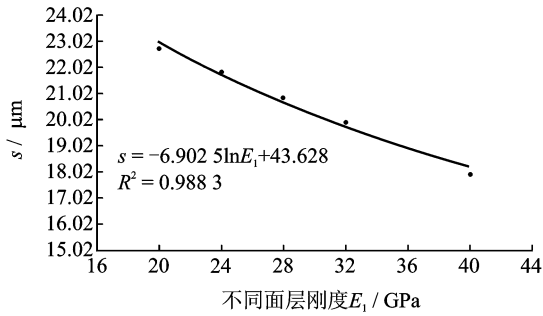
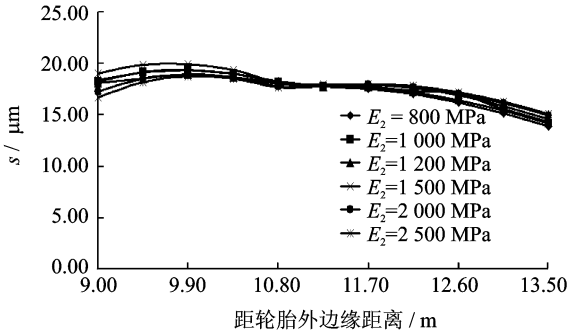
$$s = -6.902 5 \ln E_1 + 43.628 \quad (4)$$

#### 3.3 基层回弹模量 $E_2$

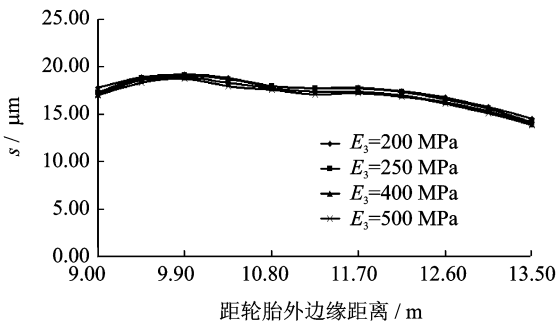
保持其他参数固定不变,基层回弹模量增大,测试区的竖向位移基本保持不变,位移曲线基本重合,如图 12 所示。由此可知,基层回弹模量对测试区位移的影响甚小。

#### 3.4 垫层回弹模量 $E_3$

保持其他参数固定不变,垫层回弹模量由 200 MPa 增大至 500 MPa,测试区竖向位移基本保

图 11  $s-E_1$  关系曲线图 12 不同基层回弹模量  $E_2$  竖向位移曲线

持不变,如图 13 所示。由此可知,垫层回弹模量的变化对测试区竖向位移影响甚小。

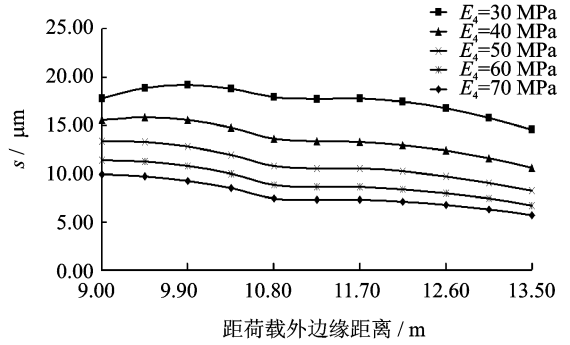
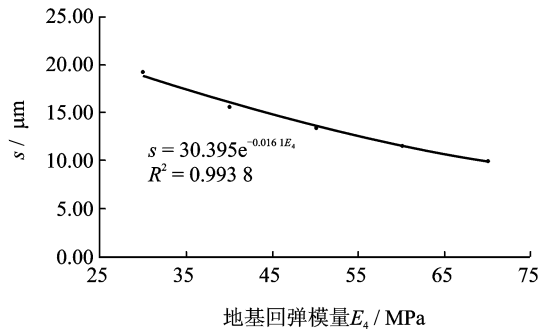
图 13 不同垫层回弹模量  $E_3$  的竖向位移曲线

### 3.5 土基回弹模量 $E_4$

其他参数固定不变,整个道面横断面方向上竖向位移随土基回弹模量  $E_4$  值的增大而减小,位移变化趋势相同,如图 14 所示。测试区位移曲线增幅明显,因为测试区位移反映的恰是土基的强度情况。

土基回弹模量由 30 MPa 增大到 70 MPa,竖向位移由  $19 \mu\text{m}$  减小到  $10 \mu\text{m}$ ,减小 53%,变化极其显著。将测试区竖向位移  $s$  与地基回弹模量  $E_4$  回归,可知  $s$  与  $E_4$  成负指数关系,相关系数为 0.993 8,如图 15 所示。

$$s = 30.395e^{-0.016 1E_4} \quad (5)$$

图 14 不同地基回弹模量  $E_4$  的竖向位移曲线图 15  $s-E_4$  关系曲线

## 4 结 论

本文将飞机荷载作用于  $15 \text{ m} \times 45 \text{ m} \times 8 \text{ m}$  的有限元模型,通过计算不同模量组合时测试区内的位移,得到以下结论:

(1) 飞机轮载作用于道面不同位置,距机轮外侧相等距离处位移值基本相同,测试区内道面竖向位移曲线基本重合,这表明机轮作用位置对测试区位移影响很小。

(2) 分析跑道测试区竖向位移对各结构层参数的敏感性表明:基层与垫层回弹模量对测试区位移几乎没有影响;面层弹性模量与厚度的变化对测试区  $9 \sim 12 \text{ m}$  范围内的竖向位移影响明显,其中面层厚度影响较大,而距飞机轮胎边缘距离大于  $12 \text{ m}$  后的测区竖向位移几乎不受面层模量的影响;对测试区位移影响最为显著的是土基回弹模量。

(3) 研究分析表明,距飞机轮胎边缘距离大于  $12 \text{ m}$  后的测区竖向位移主要受土基回弹模量影响, $9 \sim 12 \text{ m}$  的测区的竖向位移要考虑面层弹性模量、厚度以及土基回弹模量的综合影响。通过对跑道边缘区域的测试与分析可有效获取土基回弹模量,结合面层取芯等手段,可实现飞机滑行状态下跑道承载力的动态测试。

## 参考文献:

- [1] 贾建强,翁兴中,杨炳会,等. 预制块道面在飞机荷载作用下的结构响应研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2011, 2(2): 35-37.  
Jia Jianqiang, Weng Xingzhong, Yang Binghui, et al. Research on structure responses of precast block pavement under aircraft loading[J]. China Concrete and Cement Products, 2011, 2(2): 35-37.
- [2] 凌建明,刘文,赵鸿铎. 大型军用飞机多轮荷载作用下水泥混凝土道面的结构响应[J]. 土木工程学报, 2007, 40(4): 60-65.  
Ling Jianming, Liu Wen, Zhao Hongduo. Mechanical responses of rigid airport pavement to multiple-gear military aircraft loadings[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(4): 60-65.
- [3] Hammons M I. Finite element modeling for rigid pavement joints. Report II: Model development[R]. Washington D C: U S Department of Transportation Federal Aviation Administration, 1998.
- [4] 姚炳卿. 考虑接缝传荷能力的机场刚性道面板的有限元分析方法[J]. 土木工程学报, 1996, 26(3): 22-31.  
Yao Bingqing. Analysis of airport rigid pavement slab considering load transfer capacity of joint by finite element method [J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 26(3): 22-31.
- [5] 李洪亮,王晓华,沈可. 天津滨海新区重载交通工作区深度的分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S): 158-161.  
Li Hongliang, Wang Xiaohua, Shen Ke. Analyses of the working depth of the heavy vehicle loads in Tianjin Binhai New Area [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S): 158-161.
- [6] 周正峰. 机场水泥混凝土道面接缝传荷能力研究[D]. 上海:同济大学, 2008.  
Zhou Zhengfeng. Joint load transfer capacity study of airport cement concrete pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [7] 周正峰,凌建明. 基于 ABAQUS 的机场刚性道面结构有限元模型[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3): 39-44.  
Zhou Zhengfeng, Ling Jianming. Finite element model of airport rigid pavement structure based on ABAQUS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 39-44.
- [8] 黄立葵,盛灿花. 车辆动荷系数与路面平整度的关系[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 27-30.  
Huang Likui, Sheng Canhua. Relationship between vehicle dynamic amplification factor and pavement roughness[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(3): 27-30.
- [9] 吕耀志,董倩,胡春飞,等. 跑道动荷载与国际平整度指数关系研究[J]. 中外公路, 2013, 33(3): 74-77.  
Lü Yaoshi, Dong Qian, Hu Chunfei, et al. The study on relationship between aircraft dynamic load and international roughness index[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(3): 74-77.
- [10] 中国民航机场建设集团公司. 民用机场水泥混凝土道面设计规范[S]. MHJ 5004—2010. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [11] 宋金华,张彩利. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.  
Song Jinhua, Zhang Caili. Pavement engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [12] 冷培义. 机场道面设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.  
Leng Peiyi. Pavement design [M]. Beijing: China Communications Press, 1995.
- [13] 刘文,凌建明,赵鸿铎. 考虑接缝影响的机场水泥混凝土道面结构响应[J]. 公路交通科技, 2007, 24(12): 15-18.  
Liu Wen, Ling Jianming, Zhao Hongduo. Analysis on mechanical responses of rigid airport pavement with load transfer of joints [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 24(12): 15-18.

