

考虑飞机制动力的机场沥青道面力学响应分析

游庆龙, 凌建明, 赵鸿铎

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对飞机在降落制动过程中所产生的制动力对道面结构产生显著影响,并借助 ABAQUS 三维有限元软件,建立了柔性道面结构和半刚性道面结构有限元模型,分析在常用的民用飞机和新一代大型飞机荷载作用下,考虑水平制动力作用时对道面结构产生的力学响应。同时分析了以 B777-300ER、A380-800 为代表的新一代大型飞机,在考虑不同的水平制动力、土基模量、面-基层接触状况条件下对道面力学响应的影响。计算结果表明:考虑制动力后,面层最大拉应力出现在道面表面;水平制动力超过 0.5 倍单轮荷载后,使得面层内部的拉应力急剧增大;层间的不良接触对半刚性道面结构影响较大,当面-基层的接触系数大于 0.5 后,对面层内部的最大剪应力和面层底部的拉应力影响不显著。

关键词: 机场工程; 沥青道面; 制动力; 层间接触; 三维有限元

中图分类号: U416.223; V351.11

文献标识码: A

Mechanical Response Analysis of Asphalt Concrete Pavement Considering Braking Force of Aircraft

YOU Qinglong, LING Jianming, ZHAO Hongduo

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

Abstract: Some significant impact produced in asphalt concrete pavement by braking force when aircraft landing. Three-dimensional finite element model for semi-rigid pavement and flexible pavement structure was created with ABAQUS software. Finite element model was adopted to analyze the mechanical response of the civil aircraft and new generation large aircraft with a consideration of the braking force. Meanwhile, an analysis was made of the influence of different braking force, different subgrade modulus and different interface condition between surface and base for B777-300ER and A380-800. The results show that the maximum tensile stress of surface appears at the top of

pavement by considering the braking force. The tensile stress in the surface increases significant when the braking force exceeds 0.5 times of the single wheel load. The interface condition between surface and base affects the semi-rigid pavement more. When the contact coefficient between surface and base exceeds 0.5, influence for the maximum shear stress in the surface and the tensile stress at the bottom of surface is not significant.

Key words: airport engineering; asphalt concrete pavement; braking force; inter-layer contact; three dimensional finite element

飞机在道面上滑行时,道面除受到垂直荷载外,飞机与道面间的相互作用还会产生水平荷载,特别是在机轮制动时,道面上作用的水平荷载可以达到 0.1~1.0Pd(Pd 为机轮的垂直荷载),大大超过机轮不制动时产生的水平荷载^[1]。对于沥青道面结构,过大的水平力能够使道面产生波浪、拥包和剪切破坏等损坏。

由于水平力的作用而引起的沥青路面的破坏已有学者对此进行了研究,水平力的作用会导致面层拉应力增大,同时频繁的水平制动力作用会降低路面结构的耐久性能^[2-4]。对于沥青道面结构,飞机的轮轴结构复杂轴载大,特别是随着以 B-777、A380 为代表的新一代大型飞机(New Generation Large Aircraft, NGLA)的出现^[5-6],其具有轮轴数多、起落架构型复杂、轴载重等特点,水平制动力对道面结构的影响已经不能够忽略^[7-8],而现有的沥青道面结构设计方法并没有考虑到水平制动力对道面结构的影响^[9-10]。

为了解飞机制动力作用下道面结构的力学响应规律,本文采用 ABAQUS 大型有限元软件,建立飞机全起落架荷载模型,分析不同起落架构型飞机荷

收稿日期: 2010-11-23

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空总局联合项目(60776818)

作者简介: 游庆龙(1982—),男,博士研究生,主要研究方向为机场沥青道面结构设计。E-mail: youqinglong0730@163.com

凌建明(1966—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为路基路面及机场工程。E-mail: jmling01@yahoo.com.cn

载作用下,柔性道面和半刚性道面结构的力学响应规律,同时对道面结构参数敏感性进行分析。

1 分析模型与假定

1.1 基本假定

三维有限元模拟弹性层状体系结构,基本的假定如下^[11]:

(1) 各层都是由均质的各向同性的线弹性材料组成,其弹性模量和泊松比为 E 和 μ ;

(2) 假定土基在水平方向和向下的深度方向均为无限,其上的道面结构各层厚度均为有限,但水平方向仍为无限。

(3) 每一层之间的接触除定义了接触类型外的,其余皆假设为完全连续的。

1.2 飞机荷载计算参数

常用民用飞机的主起落架构型可以分为单轴双轮、双轴双轮、三轴双轮和复合型等类型^[12]。计算中分别选取 B737-800、B767-200、B777-300ER、B747-400、A380-800 起落架进行分析。机轮接触面积通常近似由一个矩形和两个半圆形组成,为了简化分析,可按总面积相等的原则假定为矩形接触面积^[11]。具体尺寸见表 1,飞机的制动力取 0.5 倍飞机单轮荷载。

1.3 道面结构模型

新建的沥青道面结构型式主要有柔性道面结构和半刚性道面结构,综合分析国内外道面结构类型和结构响应分析成果的基础上,结合未来机场道面的发展趋势^[13],采用表 2 所示的两种道面结构类型,按照表中的参数建立相应的有限元计算模型。

表 1 飞机荷载参数

Tab.1 Airplane load parameters

飞机类型	主起落架构型	制动时单轮水平荷载/kN	主起落架单轮荷载/kN	主起落架轮胎压力/MPa	轮印尺寸	
					宽/mm	长/mm
B737-800	单轴双轮	117.5	235.0	1.407	323.1	517.0
B767-200	双轴双轮	121.4	242.8	1.31	340.3	544.6
B777-300ER	三轴双轮	159.1	318.1	1.524	361.2	577.9
B747-400	混合型	147.5	294.9	1.379	365.6	585.0
A380-800	混合型	166.7	333.4	1.338	394.6	631.4

表 2 道面结构类型与材料参数

Tab.2 Type of pavement structure and material parameters

道面结构类型	结构层	材料类型	结构层厚度/mm	回弹模量/MPa	泊松比
柔性道面结构	面层	沥青混凝土(AC)	100	1 800	0.30
	基层	沥青稳定碎石(AS)	400	800	0.30
	底基层	粒料(GA)	300	300	0.35
	土基	土(Soil)	∞	30	0.40
半刚性道面结构	面层	沥青混凝土(AC)	180	1 800	0.30
	基层	水泥稳定碎石(CGA)	200	2 000	0.20
	底基层	水泥稳定碎石(CGA)	300	1 500	0.20
	垫层	粒料(GA)	200	200	0.35
	土基	土(Soil)	∞	30	0.40

1.4 三维有限元模型

1.4.1 模型尺寸与边界条件

大型飞机的起落架间距一般在 10 m 左右,同时根据飞机荷载的对称性,垂直飞机滑行方向的尺寸取一半。因此在有限元分析中,道面结构分析模型的几何尺寸为 $15 \times 30 \times 10$ m(垂直飞机滑行方向 \times 平行飞机滑行方向 \times 厚度方向)就能够满足计算的要求^[14]。

1.4.2 单元模型

三维六面体单元可分为线性 8 节点单元、二次 20 节点单元、27 节点单元等类型。通过对同一单元尺寸,不同单元类型进行分析,并将计算的结果与 BISAR 结果进行对比。结果说明道面结构模型的单元类型宜采用三维六面体线性减缩积分单元 C3D8R,并将关键区域(荷载作用区)的单元尺寸控制在 5 cm 以下。

2 道面结构力学响应分析

利用所建立的有限元模型,分析在不同起落架构型飞机作用下,道面结构在有水平制动力和没用

水平制动力条件下的力学响应. 荷载作用下两种道面结构的面层最大拉应力、半刚性基层底部最大拉应变、路表弯沉、土基顶面的压应变的最大值分别如表3和表4.

从以上的计算结果可以看出,有无水平荷载对

表3 半刚性基层沥青道面结构
Tab.3 Semi-rigid pavement structure

飞机类型	主起落架构型	面层最大拉应力/KPa			半刚性基层底部最大拉应变($\mu\epsilon$)			路表弯沉/mm	
		0P	0.5P	Δ	0P	0.5P	Δ	0P	0.5P
B737-800	单轴双轮	60.9	88.5	27.6	331.6	334.7	3.6	2.9	2.9
B767-200	双轴双轮	115.2	169.7	54.5	335.8	349.8	14.0	4.8	4.8
B777-300ER	三轴双轮	180.3	269.4	89.1	466.7	470.1	3.4	7.5	7.5
B747-400	混合型	163.6	223.6	60	356.5	370.0	13.5	7.6	7.6
A380-800	混合型	203.0	295.2	92.2	443.0	447.6	4.6	10.2	10.2

注: Δ 为水平制动力为 0.5P 时与无水平力时力学响应之间的绝对差.

表4 柔性基层沥青道面结构
Tab.4 Flexible pavement structure

飞机类型	主起落架构型	面层最大拉应力/KPa			沥青碎石层底部最大拉应变($\mu\epsilon$)			路表弯沉/mm		土基顶面压应变($\mu\epsilon$)		
		0P	0.5P	Δ	0P	0.5P	Δ	0P	0.5P	0P	0.5P	Δ
B737-800	单轴双轮	108.0	150.4	42.4	394.5	397.9	3.4	3.9	3.9	-1 616	-1 632	16
B767-200	双轴双轮	151.0	260.3	109.3	361.8	388.4	26.6	5.9	5.9	-1 879	-1 896	17
B777-300ER	三轴双轮	278.4	466.1	187.7	688.8	699.9	11.1	10.5	10.5	-3 146	-3 154	8
B747-400	混合型	251.8	337.2	85.4	474.0	503.4	29.4	9.14	9.18	-2 175	-2 204	29
A380-800	混合型	315.8	449.9	134.1	569.6	578.6	9.0	11.7	11.7	-2 459	-2 469	10

注: Δ 为水平制动力为 0.5P 时与无水平力时力学响应之间的绝对差.

道面结构竖向力学指标基本没有影响,而对水平向指标的影响范围也仅限于道面表面. 随着轮轴的增加,对半刚性道面结构水平制动力导致面层最大拉应力由单轴双轮的增加 27.6 KPa,到 A380-800 飞机的增加 92.2 KPa. 飞机轴载的增加会导致道面表面的水平拉应力增加,从而可能会导致道面拉裂.

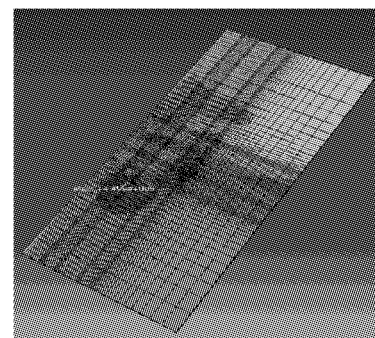
同时飞机轮载作用下面层的最大拉应力出现在沥青混凝土的表面, A380-800 飞机作用下沥青混凝土面层最大拉应力位置如图 1.

两种不同的道面结构型式下,面层拉应力最大值出现在道面表面主起落后面一定距离的位置,在飞机制动力的作用下,机场沥青道面结构最先出现破坏的位置可能在面层表面.

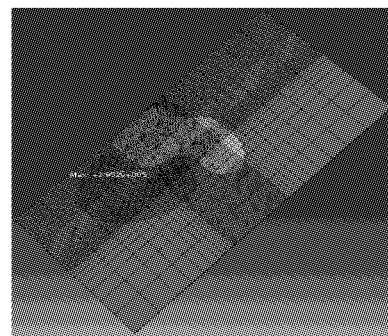
3 道面结构参数敏感性分析

3.1 制动力的大小

新一代大型飞机具有轴载重、轮轴数多的特点,在降落过程中其产生的制动力较普通的民用飞机要大,为了考察新一代大型飞机在制动力作用下道面



a 柔性道面



b 半刚性道面

图1 面层最大拉应力位置

Fig.1 Maximum tension stress positions of surface

结构的力学响应,现以 A380-800、B777-300ER 为荷载模型,水平制动力分别为单轮荷载的 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0 倍时面层底部、基层底部最大拉应力如图 2。

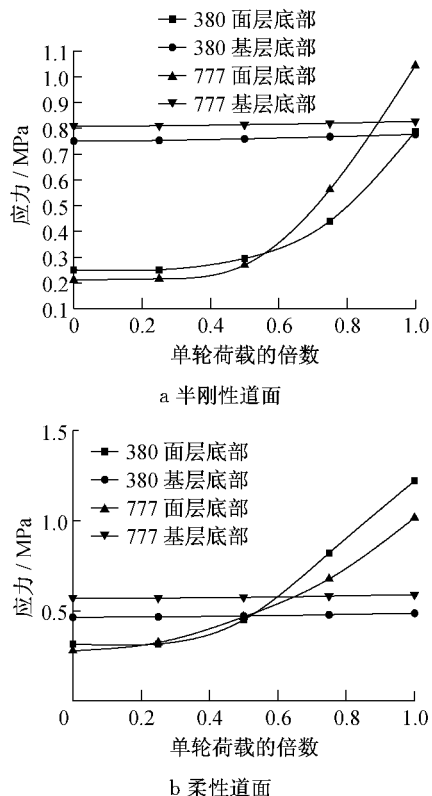


图 2 制动力-结构层底部拉应力变化关系图

Fig.2 Relationship of braking force-tension stress

随着制动力的增大,面层底部的拉应力逐渐增大,特别是当制动力超过单轮荷载的 0.5 倍时,面层底部的拉应力剧增;飞机制动力的对于基层底部的拉应力基本没有影响.因此当飞机在非正常着陆时会对面层产生一次性的破坏。

3.2 层间接触条件

由图 3 可见,面-基层之间的接触状况由完全滑动到完全连续,在 A380 飞机作用下半刚性道面结构下最大剪应力相差 10.1%,面层底部拉应力在层间接触摩擦系数为 0.5 时急剧变小,接触摩擦系数继续增加后,拉应力变化趋于平缓.对于柔性道面,最大剪应力和面层底部的拉应力变化都比较平缓,层间的接触状况影响不大.主要因为半刚性基层模量过高,虽然能够提高整体结构的抗竖向变形能力,但是当层间接触不良时,却使得面层底部的拉应力急剧增加.因此,应适当降低半刚性基层材料的模量。

3.3 土基模量

土基模量对道面表面的弯沉和土基顶面的压应变的影响分别如图 4 和图 5。

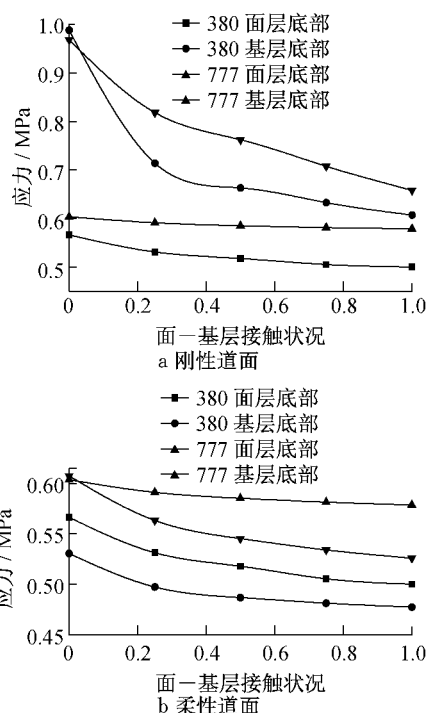


图 3 面-基层接触状况与道面结构力学关系图

Fig.3 Relationship of interface conditions between surface and base-mechanical response

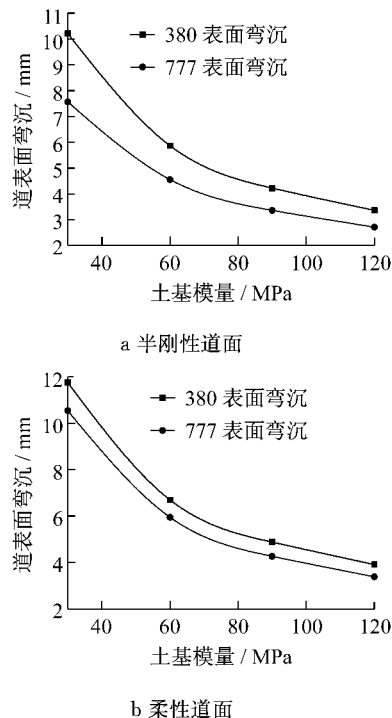


图 4 土基强度-表面弯沉关系图

Fig.4 Relationship of the module of subgrade-deflection

两种机型作用下的,随着土基模量的增加道面表面的弯沉不断减小,土基顶面的竖向压应变也在降低,当模量小于 60 MPa 时,曲线的斜率急剧增加。

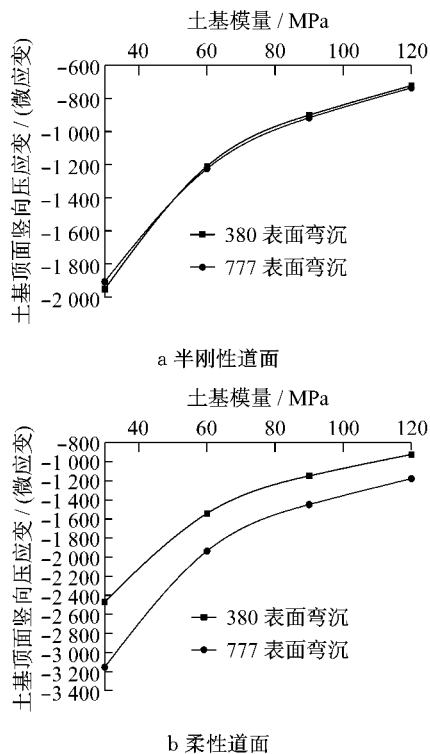


图5 土基强度—土基顶面压应变关系图

Fig.5 Relationship of the module of subgrade - strain at the top of subgrade

4 结论

(1) 利用 ABAQUS 有限元软件建立了柔性道面结构和半刚性沥青道面结构有限元模型,能够较好地模拟不同起落架构型飞机荷载作用下道面结构的力学响应。

(2) 利用建立的有限元模型,模拟民用飞机在考虑水平制动力作用时,柔性道面和半刚性道面结构力学响应,得出对新一代大型飞机制动力的大小已经不能忽略,同时,考虑制动力后,面层最大拉应力出现在道面表面。

(3) 以 A380-800、B777-300ER 为例,分析了在考虑制动力时水平力的大小、面-基层的接触状况、土基模量时,三者对道面结构力学响应的影响规律。得出了水平制动力超过 0.5 倍单轮荷载后,会使得面层内部的拉应力急剧增大;层间的不良接触对半刚性道面结构影响较大,当面-基层的接触系数大于 0.5 后,对面层内部的最大剪应力和面层底部的拉应力影响不显著。

参考文献:

[1] 冷培义,翁兴中,蔡良才. 机场道面设计[M]. 北京:人民交通出版社,1995.

LENG Peiyi, WENG Xingzhong, CAI Liangcai. Airport pavement design [M]. Beijing: China Communications Press, 1995.

[2] 聂忆华,张起森. 高等级公路沥青路面剪应力分析与应用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2007, 38(6): 1232.

NIE Yihua, ZHANG Qisen. Analysis and application of shear stress in high-type asphalt pavement [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(6): 1232.

[3] 马新,郭忠印,李志强,等. 动载作用下沥青路面的剪切破坏机理[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 34.

MA Xin, GUO Zhongyin, LI Zhiqiang, et al. Shear destruction mechanism of asphalt pavement under moving load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 34.

[4] 颜可珍,江毅,黄立葵,等. 层间接触对沥青加铺层性能的影响[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(5): 11.

YAN Kezhen, JIANG Yi, HUANG Likui, et al. Effect of bond condition on overlay performance [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(5): 11.

[5] Boeing Commercial Airplane Group. 777-200/300 Airplane Characteristics for Airport Planning[R]. Washington D C: The Boeing Company, 2004.

[6] Airbus Industrial. A380 airplane characteristics [R]. Paris: Airbus SAS Customer Services, 2005.

[7] Gopalakrishnan Kasthurirangan, Thompson R Marshall. Assessing damage to airport pavement structure due to complex gear loads [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(11): 888.

[8] Helwany Sam, Dyer John, Leidy Joe. Finite-element analyses of flexible pavements [J]. Journal of Transportation Engineering. 1998, 124(5): 491.

[9] 中国民用航空总局. MH 5010—1999 民用机场沥青混凝土道面设计规范[S]. 北京:中国民用航空总局, 2000.

China Civil Aviation Administration. MH 5010—1999 Specification for asphalt concrete pavement design of civil airport [S]. Beijing: China Civil Aviation Administration, 2000.

[10] U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. 150/5320—6E Airport pavement design and evaluation [S]. Washington D C: U S Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2009.

[11] 姚祖康. 公路设计手册——路面[M]. 北京:人民交通出版社, 2006.

YAO Zukang. Highway design manual——pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.

[12] Unified Facilities Criteria (UFC). UFC 3—260—02 Pavement design for airfields [S]. Washington D C: Army Corps of Engineers (Preparing Activity), Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency, 2001.

[13] 刘文. 机场沥青道面设计指标及方法研究[D]. 上海:同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 2008.

LIU Wen. Study on design indexes and methods for asphalt airport pavement [D]. Shanghai: Tongji University. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, 2008.

[14] 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:同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 2007.

ZHAO Hongduo. New generation large aircraft oriented load analysis method and parameters for asphalt pavement design [D]. Shanghai: Tongji University. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, 2007.