

材料非线性对沥青道面结构力学响应的影响

游庆龙¹, 凌建明²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 借助三维有限元软件, 建立半刚性基层沥青道面和柔性基层沥青道面结构模型, 分析了 B737, B767, B777 飞机荷载作用下, 土基材料非线性、粒料材料非线性、土基和粒料材料均为非线性三种情况时对道面结构力学响应的影响。结果表明, 在三类不同起落架荷载作用下, 随着轮载的增加, 材料非线性对道面结构力学响应的影响逐渐增加, 土基非线性对两种道面结构的力学响应影响不明显。半刚性基层沥青道面结构, 粒料非线性与土基和粒料均为非线性时对道面表面弯沉和土基顶面竖向压应变影响不显著, 但对沥青面层底部的拉应变和半刚性基层底部的拉应力影响较为明显。柔性基层沥青道面结构, 粒料非线性对表面弯沉的影响不显著, 但对土基顶面竖向压应变影响较大, 土基和粒料均为非线性时对沥青面层底部拉应变的影响明显。

关键词: 机场工程; 沥青道面; 结构响应; 有限元分析; 非线性

中图分类号: U416.223; V351.11

文献标志码: A

Nonlinear Influence of Material on Mechanical Response of Airport Asphalt Pavement

YOU Qinglong¹, LING Jianming²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Three-dimensional finite element model for asphalt pavement structure with semi-rigid or flexible base was proposed. It was used to analyze the influence of nonlinearity of granule and subgrade soil on the mechanical responses of airport asphalt pavement under loading of aircraft B737, B767 and B777. It was shown that the influence of material nonlinearity increased as the aircraft loading increased. The influence of subgrade nonlinearity is not obvious on the mechanical response. For the semi-rigid base airport pavements, the influence of granula nonlinearity and that of both subgrade and granula is little on the surface deflection at

the top of the surface and the vertical compressive strain at the top of the subgrade, but is great on the tensile strain at the bottom of the asphalt concrete layers and the tensile stress at the bottom of semi-rigid base. For the flexible airport pavement, the influence of granula nonlinearity is little on the surface deflection and is great on the tensile strain at the bottom of the asphalt concrete layers. Both the influence of subgrade nonlinearity and granula nonlinearity is great on the tensile strain at the bottom of the asphalt concrete layers.

Key words: airport engineering; asphalt pavements; mechanical response; finite element analysis; nonlinearity

沥青道面结构在飞机荷载与环境因素的综合作用下, 道面性能会出现不同程度的衰减变化。以 B777, A380 为代表的新一代大型飞机 (new generation large aircraft, NGLA)^[1-2] 具有起落架轮轴数多、起落架构型复杂、轴载重、胎压高、制动水平力大等特点, 在这种起落架的作用下, 机场道路结构力学响应更加趋于复杂, 对道面的强度和性能也提出了更高的要求。

以 CBR (California Bearing Ratio) 法为代表的经验法已经不能适应新一代大型飞机起落架的要求, 力学经验法已成为道面结构设计方法发展的趋势^[3-4]。国外目前常用的力学经验法是以弹性层状体系为理论基础, 假设各结构层材料为线弹性, 以定值模量、静态轮载、轴对称的方式作用在各弹性层上。但实际上粒料材料是一种典型的非线性材料, 其回弹模量通常随荷载的增加而变化, 受轮载竖向应力和侧向应力影响很大^[5-7]。机场道面的结构力学响应分析是力学-经验法道面结构设计的核心内容。Zhao 等^[8] 分析了不同的沥青道面结构在多轮荷载作用下道面结构的叠加效应。Michael 等^[9] 考虑新一代大型飞机的特点, 建立了三维有限元分析模型, 分析了新

收稿日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(51308064); 中国博士后科学基金(2014M552398); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014G1211009); 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)

第一作者: 游庆龙(1982—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为机场沥青道面结构与材料。E-mail: youqinglong0730@163.com

一代大型飞机荷载作用下沥青道面结构的力学响应. Beena 等^[10] 基于 NAPTF (National Airport Pavements Test Facility) 数据,建立了沥青道面结构三维有限元模型,分析了移动荷载作用下路基的剪切破坏行为. Charles 等^[11] 考虑基层材料的非线性,分析了不同轮载条件时,材料非线性对沥青路面结构的力学行为的影响. 以上研究对于了解材料的非线性对结构力学响应的影响起到一定的作用,但其没有考虑到道面土基和粒料两种材料的非线性变化对结构力学响应的影响,也没有考虑不同飞机起落架构型对道面结构力学响应的影响差异.

为了研究材料非线性对沥青道面结构力学行为的影响,笔者利用通用有限元软件,建立 B737, B767, B777 飞机全起落架的构型,分析在不同起落架构型的飞机荷载作用下,道面材料的非线性对柔性道面和半刚性道面结构力学响应规律的影响.

1 土基和粒料材料的非线性本构模型

1.1 材料弹塑性行为描述及屈服准则

弹塑性材料进入塑性的特征是当荷载卸去以后存在不可恢复的永久变形,因而在涉及卸载的情况下,应力应变之间不再存在惟一的对应关系,这是弹塑性材料区别于弹性材料和非线性弹性材料的基本属性. Mohr-Coulomb 强度准则在岩土工程中的应用十分广泛, Mohr-Coulomb 模型共有 4 个基本参数:弹性模量、泊松比、内摩擦角、黏聚力.

1.1.1 模型特性

(1) 模拟服从经典 Mohr-Coulomb 屈服准则的材料.

(2) 允许材料各向同性硬化或软化.

(3) 采用光滑的塑性流动势,流动势在子午应力面上为双曲线形状,在偏应力平面上为分段椭圆形.

(4) 与线弹性模型结合使用.

(5) 可用来模拟单调荷载作用下材料的力学性状.

1.1.2 屈服准则

Mohr-Coulomb 屈服准则假定:作用在某一点的剪应力等于该点的抗剪强度时,该点发生破坏,剪切强度与作用在该面的正应力成线性关系. Mohr-Coulomb 模型是基于材料破坏时应力状态的莫尔圆提出的,破坏线是与这些莫尔圆相切的直线,如图 1 所示. Mohr-Coulomb 的强度准则为

$$\tau = c - \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ 为剪切强度; c 为材料的黏聚力; σ 为正应力; φ 为材料的内摩擦角.

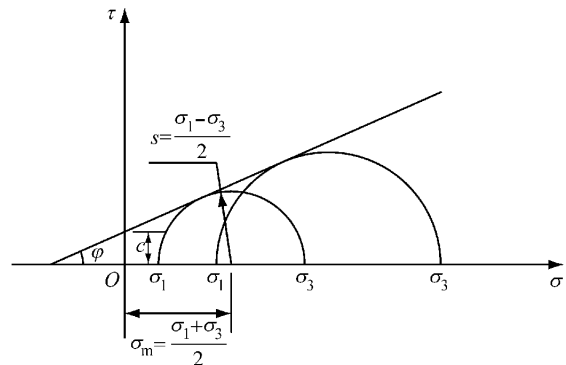


图1 Mohr-Coulomb 破坏模型

Fig.1 Failure criterion for Mohr-Coulomb

和 Drucker-Prager 屈服准则不同, Mohr-Coulomb 屈服准则假定材料的破坏和中主应力无关,典型的岩土材料的破坏通常会受中主应力的影响,但这种影响比较小,所以,对于大部分的应用来说, Mohr-Coulomb 准则都具有足够的精度. 在 π 平面上, Mohr-Coulomb 模型为等边不等角的六边形,屈服面存在尖角,如图 2 所示.

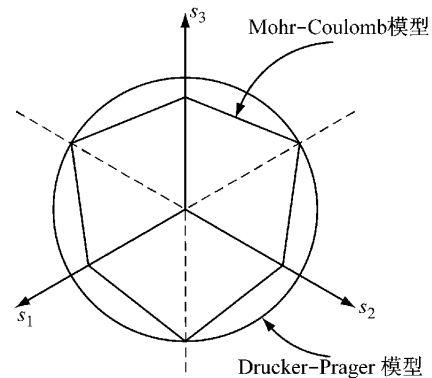


图2 Mohr-Coulomb 模型在 π 平面上屈服面

Fig.2 Yield surfaces of Mohr-Coulomb model in π plane

ABAQUS 软件采用的本构模型是经典 Mohr-Coulomb 屈服准则的扩展,采用 Mohr-Coulomb 屈服函数,包括黏聚力的各向同性的硬化和软化,但该模型的流动势函数在子午面上的形状为双曲线,在 π 平面上没有尖角,因此势函数完全光滑,确保了塑性流动方向的唯一性.

1.2 道面结构设计参数及非线性参数

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. 在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^[12],采用如表 1 和表 2 的道面结构类型。

表 1 柔性基层道面结构(FS)材料参数
Tab.1 Flexible pavement structure and material parameters

结构层	材料类型	结构层厚度/mm	回弹模量 E /MPa	泊松比	Mohr-Coulomb 模型	
					c /MPa	φ / (°)
面层	沥青混凝土	100	1 800	0.30		
基层	沥青稳定碎石	400	800	0.30		
底基层	粒料	300	300	0.35	0	45
土基	土	∞	60	0.40	0.001	22

表 2 半刚性道面结构(SR)材料参数
Tab.2 Semi-rigid base asphalt airfield pavement structure and material parameters

结构层	材料类型	结构层厚度/mm	回弹模量 E /MPa	泊松比	Mohr-Coulomb 模型	
					c /MPa	φ / (°)
面层	沥青混凝土	180	1 800	0.30		
基层	水泥稳定碎石	200	2 000	0.20		
底基层	水泥稳定碎石	300	1 500	0.20		
垫层	粒料	200	200	0.35	0	30
土基	土	∞	30	0.40	0.001	22

沥青混凝土道面结构是一种由多种材料组成的多层结构体系,其材料种类非常丰富,包括沥青混合料、无机结合料稳定材料、碎石、土等。各种材料具有不同的应力-应变特性,其中,沥青混凝土具有黏弹塑性,土和粒料具有明显的非线性特征,水泥稳定碎石通常可认为是弹性材料。限于篇幅,本文仅分析土基和粒料材料的非线性特性对道面结构的影响。因此,借鉴国内外相关试验数据和数值分析成果^[13],粒料和土基采用 Mohr-Coulomb 模型来模拟其非线

性本构关系,其他材料认为服从弹性本构关系,相关参数见表 1,表 2。分别对土基材料的非线性、粒料材料的非线性、土基和粒料材料皆为非线性三种情况进行分析。

2 三维有限元模型及参数

2.1 基本假定

三维有限元模拟弹性层状体系结构,基本假定如下^[14]:

(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分别为 E 和 μ 。

(2)土基在水平方向和深度方向均为无限,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)每一层之间的连接皆为完全连续。

2.2 飞机荷载计算参数

起落架的构型直接决定飞机荷载对道面的作用方式。我国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^[15]。在计算中分别选取 B737-300, B767-300ER, B777-300ER 飞机起落架进行分析。飞机主起落架荷载分配系数取 0.95。

根据国内外研究经验,模型采用结构化网格能保证一定的计算精度。为简化分析,可按总面积相等的原则假定为矩形接触面积^[14],计算结果见表 3。

表 3 飞机荷载参数

Tab.3 Load parameters of aircraft

机型	最大起飞重量/kN	起落架类型	一个主起落架轮子数/ n_w	主起落架单轮荷载 P_s /kN	胎压 p /MPa	矩形网格	
						长/m	宽/m
B737-300	622.33	单轴双轮	2	147.27	1.386	0.393	0.271
B767-300ER	1 835.87	双轴双轮	4	217.48	1.310	0.491	0.338
B777-300ER	3 453.92	三轴双轮	6	272.73	1.524	0.510	0.351

2.3 三维有限元模型

机场沥青道面结构三维有限元分析的数值模型已经在文献^[16]作过详细的论述,本文选用其推荐的三维有限元模型。模型的边界条件为:水平向约束该方向的位移,底部约束所有方向的位移,层间采用完全连续。道面结构模型的单元类型采用 C3D8R 三维六面体线性减缩积分单元,并将关键区域(荷载作用区)的单元尺寸控制在 5 cm。

3 材料非线性对半刚性基层沥青道面结构力学响应的影响

3.1 道面表面弯沉

不同机型荷载作用下,考虑材料的非线性特性,道面表面弯沉最大值如表 4 所示。B737 飞机荷载作用下,考虑不同材料的非线性时,对表面弯沉最大值基本没有影响,线弹性结果与土基非线性结果一样,

粒料非线性与同时考虑土基和粒料非线性计算结果一致,两者之间的差异仅为-1.9%。随着飞机荷载的增加,材料非线性对表面弯沉的影响逐渐增大,但土基非线性增加不明显,与线弹性的差异在2.0%以内,其余机型荷载作用下考虑非线性与线弹性之间的差异如表4所示。

表4 不同机型道面表面弯沉

Tab.4 Deflection of different aircrafts

结构材料特性	表面弯沉/mm		
	B737 飞机	B767 飞机	B777 飞机
土基和粒料为线弹性	1.313	2.592	4.078
仅土基非线性	1.313(0)	2.598(0.2)	4.127(1.2)
仅粒料非线性	1.338(1.9)	2.641(1.9)	4.143(1.6)
土基和粒料皆为非线性	1.338(1.9)	2.648(2.2)	4.202(3.0)

注:表中括号内数值为考虑材料层非线性后的力学响应与材料为线弹性时力学响应的差异,单位为%,下同。

3.2 土基顶面竖向压应变

不同机型荷载作用下,考虑材料的非线性特性,土基顶面的竖向压应变如表5所示。B737飞机荷载作用下,材料的非线性特性对于土基顶面的竖向压应变基本没有影响,线弹性结果与土基非线性结果基本一致,粒料非线性与同时考虑土基和粒料非线性计算结果基本一致,这两类结果之间的差异为3.5%。随着飞机荷载等级的增加,材料非线性效应对土基顶面的竖向压应变的影响逐渐增大,其中最大的为B777飞机作用时,其差异值为2.8%。

表5 不同机型土基顶面竖向压应变

Tab.5 Vertical compressive strain at the top of subgrade of different aircrafts

结构材料特性	竖向压应变/ 10^{-6}		
	B737 飞机	B767 飞机	B777 飞机
土基和粒料为线弹性	496	833	1 099
仅土基非线性	496(0)	820(1.6)	1 068(2.8)
仅粒料非线性	513(3.4)	837(0.5)	1 124(2.3)
土基和粒料皆为非线性	514(3.4)	828(0.5)	1 107(0.7)

3.3 沥青面层底部拉应变

考虑材料非线性后三种机型面层底部的横向拉应变如表6所示。考虑材料非线性后与线弹性之间的差异不大,B737飞机的差异最小,都在2.0%以内,随着轮轴荷载的增加,差异不断增加,B777飞机荷载作用时差异最大值为-3.6%。

考虑材料非线性后三种机型面层底部的纵向拉应变如表7所示。由表7可知,面层底部纵向拉应变的差异随着轮载的增加而增加。在B777飞机荷载作用下,同时考虑土基和粒料的非线性时,其差异值最大,为6.9%。

表6 不同机型面层底部横向拉应变

Tab.6 Transverse tensile strain at the bottom of surface layers of different aircrafts

结构材料特性	横向拉应变/ 10^{-6}		
	B737 飞机	B767 飞机	B777 飞机
土基和粒料为线弹性	96.2	72.8	102.2
仅土基非线性	96.2(0)	73.0(0.2)	104.6(2.3)
仅粒料非线性	94.8(1.5)	74.7(2.6)	104.3(2.1)
土基和粒料皆为非线性	94.8(1.5)	75.0(2.9)	105.9(3.6)

表7 不同机型面层底部纵向拉应变

Tab.7 Longitudinal tensile strain at the bottom of surface layers of different aircrafts

结构材料特性	纵向拉应变/ 10^{-6}		
	B737 飞机	B767 飞机	B777 飞机
土基和粒料为线弹性	24.0	60.7	88.4
仅土基非线性	24.0(0)	61.0(0.5)	90.7(2.6)
仅粒料非线性	25.4(5.8)	63.9(5.3)	92.1(4.1)
土基和粒料皆为非线性	25.4(5.8)	64.3(5.9)	94.5(6.9)

3.4 半刚性基层底部拉应力

由于材料非线性引起的半刚性基层底部不同方向最大水平拉应力如表8、表9所示。由表8可知,B777飞机荷载作用下,同时考虑土基和粒料的非线性特性计算的半刚性基层底部横向拉应力与线弹性的差异值最大,为17.5%。

表8 不同机型半刚性基层底部横向拉应力

Tab.8 Transverse tensile stress at the bottom of semi-rigid base layers of different aircrafts

结构材料特性	横向拉应力/MPa		
	B737 飞机	B767 飞机	B777 飞机
土基和粒料为线弹性	0.231	0.358	0.506
仅土基非线性	0.231(0)	0.362(1.0)	0.526(3.8)
仅粒料非线性	0.262(9.1)	0.401(10.7)	0.565(11.7)
土基和粒料皆为非线性	0.262(9.1)	0.407(13.7)	0.595(17.5)

由表9可知,B777飞机荷载作用下,同时考虑土基和粒料非线性后计算的纵向拉应力与线弹性的差异值最大,为16.6%。

表9 不同机型半刚性基层底部纵向拉应力

Tab.9 Longitudinal tensile stress at the bottom of semi-rigid base layers of different aircrafts

结构材料特性	纵向拉应力/MPa		
	B737 飞机	B767 飞机	B777 飞机
土基和粒料为线弹性	0.314	0.350	0.401
仅土基非线性	0.314(0)	0.353(0.9)	0.418(4.1)
仅粒料非线性	0.358(13.9)	0.392(12.1)	0.444(10.7)
土基和粒料皆为非线性	0.358(13.9)	0.397(13.6)	0.468(16.6)

4 材料非线性对柔性基层沥青道面结构力学响应的影响

4.1 道面表面弯沉

不同机型荷载作用下,考虑不同材料的非线性

特性,道面表面最大弯沉值如表 10 所示.由表 10 可知,与线弹性条件差异最大的为 B777 飞机荷载作用时,差异值为 8.9%.

表 10 不同机型道面表面弯沉
Tab.10 Deflection of different aircrafts

结构材料特性	表面弯沉/mm		
	B737 飞机	B767 飞机	B777 飞机
土基和粒料为线弹性	1.690	3.093	4.721
仅土基非线性	1.692(0)	3.132(1.2)	4.872(3.2)
仅粒料非线性	1.79(5.9)	3.234(4.6)	4.872(3.2)
土基和粒料皆为非线性	1.807(6.9)	3.351(7.0)	5.141(8.9)

4.2 土基顶面竖向压应变

不同机型荷载作用下,考虑材料的非线性特性,土基顶面的竖向压应变如表 11 所示.由表 11 可知,材料非线性的影响已经比较显著,特别是在考虑粒料非线性时,差异最大值可达 21.5%,说明在文中选取的典型结构条件下,需要考虑材料的非线性对道面力学响应的影响.

表 11 不同机型土基顶面竖向压应变
Tab.11 Vertical compressive strain at the top of subgrade of different aircrafts

结构材料特性	竖向压应变/ 10^{-6}		
	B737 飞机	B767 飞机	B777 飞机
土基和粒料为线弹性	738	1 077	1 365
仅土基非线性	713(3.4)	1 034(4.0)	1 306(4.3)
仅粒料非线性	897(21.5)	1 262(17.2)	1 592(16.6)
土基和粒料皆为非线性	912(23.6)	1 225(13.7)	1 627(19.2)

4.3 沥青面层底部拉应变

考虑材料非线性后,三种机型面层底部的纵、横向拉应变最大值如表 12,13 所示.由表 12 可知,考虑材料非线性后对面层底部最大横向拉应变有一定影响. B737 飞机荷载作用下的差异最小,都在 2.0% 以内.随着轮轴荷载的增加,差异在不断增加,最大差异为 B777 飞机荷载作用时,差异值为 10.3%.

表 12 不同机型面层底部横向拉应变
Tab.12 Transverse tensile strain at the bottom of surface layers of different aircrafts

结构材料特性	横向拉应变/ 10^{-6}		
	B737 飞机	B767 飞机	B777 飞机
土基和粒料为线弹性	188.1	96.0	114.4
仅土基非线性	187.9(1.1)	94.0(2.0)	119.2(4.0)
仅粒料非线性	185.8(1.2)	98.3(2.4)	118.6(3.7)
土基和粒料皆为非线性	184.8(1.7)	87.6(8.7)	126.2(10.3)

由表 13 可知,由于材料非线性引起的面层底部纵向最大拉应变的差异随着轮载的增加而增加. B737 飞机荷载作用下,与线弹性的差异在 10.0% 以内,与线弹性最大的差异为 B777 飞机荷载作用时,其差异值可达 23.8%.

表 13 不同机型面层底部纵向拉应变

Tab.13 Longitudinal tensile strain at the bottom of surface layers of different aircrafts

结构材料特性	纵向拉应变/ 10^{-6}		
	B737 飞机	B767 飞机	B777 飞机
土基和粒料为线弹性	48.9	73.0	100.8
仅土基非线性	48.5(0.7)	76.6(4.9)	111.3(10.4)
仅粒料非线性	46.6(4.6)	82.5(12.9)	109.6(8.7)
土基和粒料皆为非线性	44.4(9.2)	85.5(17.1)	124.8(23.8)

5 结论

(1)利用三维有限元软件建立的柔性道面结构和半刚性沥青道面结构的有限元模型,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.三类不同起落架构型飞机荷载作用下,随着起落架荷载的增加,材料非线性对道面力学响应的影响更加明显.

(2)B737 飞机和 B767 飞机荷载作用下,考虑土基非线性时对道面的力学响应影响不显著.在进行半刚性基层沥青道面结构力学行为分析时,可以不考虑土基的非线性特性对力学行为的影响,仅需考虑粒料层材料的非线性对道面力学行为的影响.在半刚性基层沥青道面结构设计中可以将道面结构粒料层和土基层材料假设为线弹性.

(3)B737 飞机和 B767 飞机荷载作用下,在进行柔性基层沥青道面结构力学行为分析时,土基非线性对力学指标的影响不大,在分析时可以假定土基材料为线弹性,仅需要考虑粒料材料的非线性对力学行为的影响.因此柔性基层沥青道面结构计算时需要考虑粒料层材料的非线性对结构计算的影响,土基可以考虑为线弹性.

(4)B777 飞机荷载作用下粒料和土基的非线性特性对半刚性基层沥青道面和柔性基层沥青道面影响比其他飞机荷载作用时要明显很多,反映了新一代大型飞机对道面的损伤应该在道面结构设计中重新定量,以确保道面结构的使用寿命和运营安全.

参考文献:

- [1] Boeing Commercial Airplane Group. 777-200/300 airplane characteristics for airport planning[R]. Seattle: The Boeing Company, 2004.
- [2] Airbus Industrial. A380 airplane characteristics for airport planning[R]. Toulouse: Airbus SAS, 2005.
- [3] 赵鸿铎,凌建明,刘文,等.机场沥青道面结构设计方法与指标探讨[J].中国民航大学学报,2007,25(5):4.

- ZHAO Hongduo, LING Jianming, LIU Wen, *et al.* Study on structure design method and indexes of airport asphalt pavement[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2007,25(5):4.
- [4] 李青,赵鸿铎,姚祖康. 基于道面响应的飞机荷载作用次数计算方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008,36(12):1637.
LI Qing, ZHAO Hongduo, YAO Zukang. Aircraft load repetition calculation methods based on pavement responses[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008,36(12):1637.
- [5] 何兆益,唐伯明. 柔性基层沥青路面非线性特性及模量研究[J]. 公路交通科技,2001,18(1):13.
HE Zhaoyi, TANG Boming. Research on nonlinear property and granular base modulus of flexible base asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001,18(1):13.
- [6] 梅迎军,梁乃兴. 砂砾石基层混合料的非线性分析[J]. 重庆交通学院学报,2004,23(3):57.
MEI Yingjun, LIANG Naixing. The nonlinear analysis of aggregate subbase [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004,23(3):57.
- [7] 凌天清,王世杰,许志鸿. 考虑材料非线性性能的沥青路面位移与应力分析[J]. 中国公路学报,1999,12(1):1.
LING Tianqing, WANG Shijie, XU Zhihong. Study of nonlinear analysis of flexible pavements[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999,12(1):1.
- [8] Zhao Hongduo, Ling Jianming, Yao Zukang. Study on pavement superposition effects under multiple aircraft tires [C]// GeoShanghai 2010 International Conference. Shanghai: GeoShanghai 2010 International Conference, 2010:546-551.
- [9] Michael Willis, Dona Johnson, Beena Sukumaran. Three-dimensional finite element analyses of flexible airport pavements for the next generation of aircrafts[C]// Airfield and Highway Pavements Specialty Conference 2006. Atlanta: American Society of Civil Engineers, 2006:13-24.
- [10] Beena Sukumaran, Michael Willis, Nishanth Chamala. Three dimensional finite element modeling of flexible pavements [C]// Geo-Frontiers Congress 2005. Austin: American Society of Civil Engineers, 2005:1-12.
- [11] Charles W Schwartz. Effect of stress-dependent base layer on the superposition of flexible pavement solutions [J]. The International Journal of Geomechanics, 2002,2(3):331.
- [12] 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,2007.
ZHAO Hongduo. New generation large aircraft oriented load analysis method and parameters for asphalt pavement design [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [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,2008.
LIU Wen. Study on design indexes and methods for asphalt airport pavement[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [14] Huang Y H. Pavement analysis and design [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.
- [15] Unified Facilities Criteria. Pavement design for airfields (UFC 3-260-02) [R]. Washington D C: Army Corps of Engineers (Preparing Activity), Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency, 2001.
- [16] 游庆龙,凌建明,袁捷,等. 适应大型飞机的沥青道面结构有限元模型[J]. 交通运输工程学报,2012,12(2):18.
YOU Qinglong, LING Jianming, YUAN Jie, *et al.* Finite element model of flexible airport pavements for the new generation large aircraft [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012,12(2):18.

(上接第 865 页)

- [6] 徐瑞华. 运输与物流系统仿真[M]. 上海:同济大学出版社, 2009.
XU Ruihua. The simulation of transport and logistics system [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2009.
- [7] 刘卫果,胡思继. 旅客交通方式选择行为研究的计算机模拟方法[J]. 系统仿真学报, 2002,13(14):47.
LIU Weiguo, HU Siji. Simulation method for the research of the passengers' traffic mode choice behavior[J]. Journal of System Simulation, 2002,13(14):47.
- [8] 马卫武,刘小燕,李立清,等. 铁路客运站旅客候车时间研究[J]. 铁道学报, 2009, 14(31):104.
MA Weiwu, LIU Xiaoyan, LI Liqing, *et al.* Research of waiting time of passengers at railway stations[J]. Journal of the China Rail, 2009,14(31):104.
- [9] 叶玉玲,程正. 客运走廊多模式交通条件下票价与运输需求的关系[J]. 城市轨道交通研究, 2011(12):32.
YE Yuling, CHENG Zheng. Relationship between passenger fares and traffic demands in regional multi-modal transportation corridor[J]. Urban Mass Transit, 2011(12):32.