

文章编号:1671-6833(2018)05-0091-06

机场道面沥青加铺结构分区域差异设计研究

李炜光<sup>1</sup>, 国 洋<sup>1</sup>, 汤 豆<sup>2</sup>, 郑敏楠<sup>3</sup>, 延丽丽<sup>4</sup>, 杨婉怡<sup>5</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710061; 2. 中交一公院深圳分院, 广东 深圳 518000; 3. 陕西交通职业技术学院, 陕西 西安 710018; 4. 抚顺市交通工程质量与安全监督处 辽宁 抚顺 113009; 5. 北京首发公路养护工程有限公司, 北京 102613)

摘 要: 针对飞机在飞行区不同区域行驶状态的极大差异造成的沥青加铺结构局部区域早期变形破坏, 本文基于 ABAQUS 软件平台分析了大型飞机荷载、温度及行驶速度变化下加铺结构的剪应力、剪应变及永久变形规律, 表明在重载、高温、低速耦合作用下沥青加铺层受力及变形将处于极限不利状态. 而通过合理安排材料类型组合及厚度可以明显降低平行滑行道、联络道的早期轮辙病害, 改善道面服务水平. 因此, 在现有设计方法的基础上, 提出以容许剪应力及容许轮辙为验算指标的飞行区不同区域沥青加铺结构差异设计方法.

关键词: 机场道面; 沥青加铺层; 耦合作用; 剪应力(变); 轮辙; 差异化设计

中图分类号: U416.02 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.011

0 引言

白改黑加铺是在不停航要求下机场水泥混凝土道面养护的首选方案, 但是, 近年来很多道面加铺后, 在平行滑行道、联络道及跑道上出现很多轮辙、推移及拥抱等病害, 严重影响飞行安全<sup>[1]</sup>.

目前机场加铺结构设计中平行滑行道、联络道、跑道的结构组合及材料类型基本相同, 并没考虑和模拟荷载作用下加铺层变形累积过程和轮辙控制指标<sup>[2]</sup>, 此外, 也没有考虑不同区域飞机行驶特性的不同对加铺结构内受力及变形的影响<sup>[3]</sup>. 基于此, 针对飞机在不同飞行区的行驶特性, 研究沥青加铺层的力学响应及轮辙形成规律, 进而提出针对不同行驶条件下, 以轮辙控制为目的的加铺结构差异化设计方法与指标.

1 应力应变分析

1.1 道面结构及材料参数

为了寻求应力、应变在加铺结构中的分布规律, 采用我国某大型民用机场的道面加铺结构及材料参数, 如表 1 所示, 设计飞机采用 B747-400.

表 1 道面结构及材料参数

Tab.1 Pavement structure and material parameters

道面结构层	厚度/cm	弹性模/MPa	泊松比μ
SMA-13 上面层	5	1 500	0.25
AC-20 下面层	8	1 200	0.25
水泥混凝土面层	38	34 000	0.15
二灰碎石上基层	18	1 500	0.20
二灰砂砾下基层	18	1 300	0.25

1.2 模型尺寸及荷载作用位置

旧水泥混凝土路面板所采用的平面尺寸为板长×板宽=5 m×5 m, 接缝宽度为 1 cm, 土基不建立体模型采用 Foundation 弹性基础代替. 在道面横向  $x$  向(垂直于飞机行驶方向)控制  $x$  向位移, 在道面纵向  $y$  向(飞机行驶方向)控制  $y$  向位移. 按照 ABAQUS 定义如下:  $x$  向上为 XSYMM 对称边界条件, 即  $U_x = UR_y = UR_z = 0$ .  $y$  向上为 YSYMM 对称边界条件, 即  $U_y = UR_x = UR_z = 0$ . 模型底部采用弹性基础模拟土基支撑作用, 其反应模量  $k = 80 \text{ MN/m}^3$ . 为节省计算时间和避免发生奇异, 采用三维 8 节点减缩积分单元<sup>[4]</sup>.

对有接缝的旧水泥混凝土板沥青加铺结构, 其最不利荷位仍位于接缝处一侧板的纵向边缘中

部. 为缩短计算时间,在荷载作用处网格划分尺寸较细,并逐渐向边界处扩展,面层网格划分尺寸较小,向基层逐渐增大. 道面加铺结构网格划分模型如图 1.

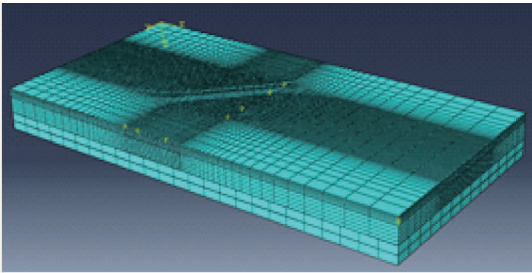


图 1 道面结构网格划分模型

Fig.1 Mesh model of pavement structure

1.3 参数影响分析

剪应力及剪应变是沥青加铺结构产生失稳流动轮辙和推移的主要诱因,所谓对轮辙破坏的分析,主要是对结构层内剪应力及混合料抗剪强度的分析,通过对剪应力及剪应变的计算分析,了解加铺结构内应力分布特征,从而在定量分析的基础上优化加铺结构组合设计及材料选取. 在接缝处沥青面层剪应力(变)较其他位置大,所以剪应力(变)计算位置选取为接缝处<sup>[5]</sup>. 在此,分析外部影响因素(大型飞机荷载、温度、行驶速度)变化时的应力应变变化规律,结果如图 2~4 所示.

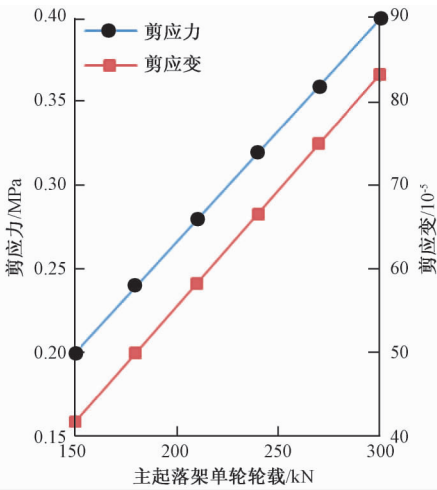


图 2 剪应力(变)随主起落架单轮轮载变化规律

Fig.2 The change law of shear(stress) with wheel load

从图 2 中可以看出,加铺层内最大剪应力、剪应变均随主起落架单轮轮载的增加而呈线性增长,轮载增大 1 倍,其剪应力、剪应变也增大 1 倍.

从图 3 可见,温度从 20 ℃ 升至 50 ℃,最大剪应力呈线性降低 10%,但最大剪应变则呈幂函数的形式增大 168%. 所以,夏季失稳型轮辙是内部

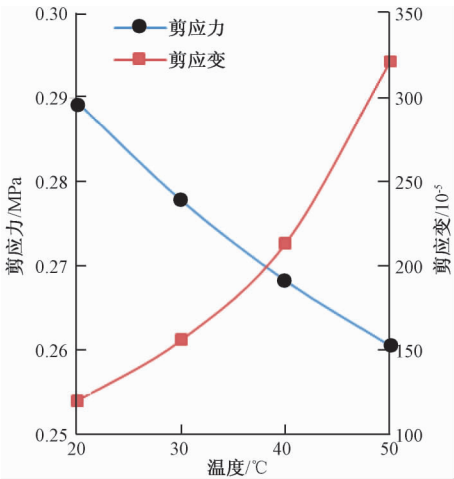


图 3 剪应力(变)随温度变化规律

Fig.3 The change law of shear(stress) with

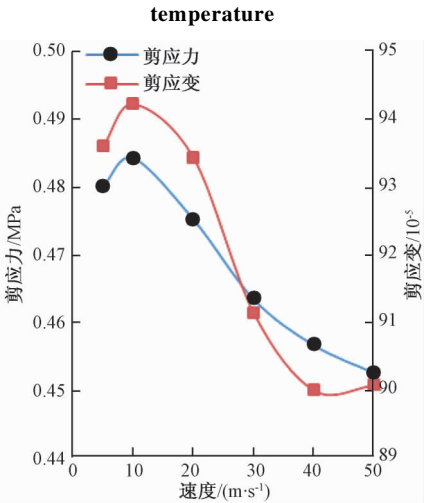


图 4 剪应力(变)随速度变化规律

Fig.4 The change law of shear(stress) with speed

抵抗变形能力降低所致,改善材料的温度敏感性是延缓轮辙产生和发展的有效措施之一<sup>[6-7]</sup>.

从图 4 可见,速度为 50 m/s 时,剪应力和剪应变分别比 10 m/s 时降低 93% 和 95.6%. 较低行驶速度时,加铺层最大剪应力及剪应变处于一个较高的水平,但随着速度的逐渐增加其值逐渐降低,并趋于平缓. 同时,相同的条件下,荷载在低速行驶区域的作用时间将是高速行驶区域的几十倍,大大增加了低速行驶区域发生病害的可能.

从上述荷载、温度及行驶速度变化对剪应力、剪应变的影响规律可以看出,平行滑行道及联络道正是处于重载、高温、低速三相耦合作用下,造成其加铺层内剪应力、剪应变急剧增大,从而处于极限不利受力状态,导致早期轮辙变形破坏. 飞机在跑道上的高速行驶状态则极大地降低了荷载作用时间,延缓了早期轮辙变形的发生. 在进行加铺结构设计时,可以根据飞机轴载、当地温度以及最

低滑行速度等因素,控制不同飞行区域的最大剪应力,有效缓解平行滑行道和联络道轮辙病害尤为重要.

2 永久变形分析

沥青混合料是一种变形特性依赖于温度、应力及时间的黏弹塑性材料,本节采用 ABAQUS 中自有的时间硬化蠕变模型模拟沥青加铺层永久变形<sup>[8]</sup>.

2.1 永久变形规律

假定飞机在平行滑行道、联络道上的平均行驶速度为 5 m/s,跑道上平均行驶速度为 50 m/s. 本节采用数值模拟方法计算加载 50 000 次后平行滑行道、联络道及跑道的沥青加铺层随主起落架单轮轮载、温度变化的永久变形规律,其结果如图 5~6 所示.

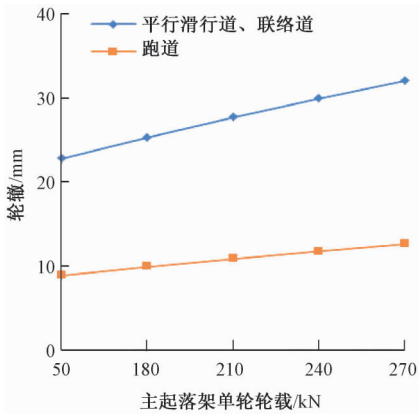


图 5 各区域轮辙随轮载变化规律

Fig. 5 The change law of rut with wheel load in different area

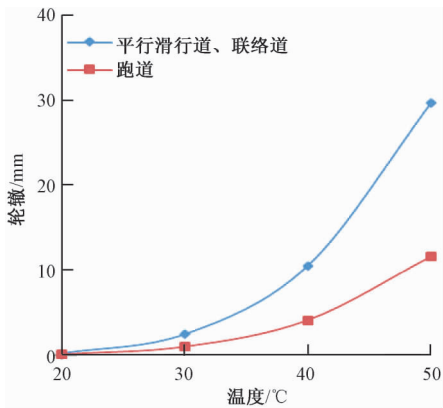


图 6 各区域轮辙随温度变化规律

Fig. 6 The change law of rut with temperature in different area

从图 5 中可以看出,随着主起落架单轮轮载逐渐增大,飞行区各区域轮辙基本呈线性增大,

单轮轴载越大,平行滑行道、联络道与跑道之间的轮辙差值越大. 单轮轮载 240 kN、行驶速度 5 m/s 的轮辙深度为 150 kN、50 m/s 下的 3.6 倍. 从图 6 可以看出,随着温度升高,飞行区各区域轮辙基本呈幂函数形式增长,并且随着温度的升高平行滑行道、联络道与跑道间的轮辙差越来越大. 50 °C、行驶速度 5 m/s 下的轮辙深度比 20 °C、50 m/s 下高出 329 倍,比 30 °C、50 m/s 下也高出 30 倍.

可见,沥青加铺道面面层敏感温度约为 30 °C. 在日间持续高温时段,重载飞机飞行是轮辙迅速发展的重要条件<sup>[9]</sup>. 而我国南方地区夏季气温可达到 35 °C 以上,而沥青道面的表面温度常能达到 60 °C 以上<sup>[10]</sup>,加之重载、低速的耦合作用,轮辙快速产生和发展. 因此,通过控制高温时段重载飞机飞行或适当提高最低滑行速度,有利于减少平行滑行道和联络道轮辙病害.

2.2 材料类型及厚度组合影响

本节所采用的材料类型为改性 AC-20、SMA-13 及 HMAC 3 种沥青混合料,组合形式分为 4 种,面层的模量逐渐增加<sup>[11]</sup>. 其中 20 °C 下 HMAC 的模量为 2 150 MPa,路面结构组合如表 2 所示. 4 种结构组合下飞行区各区域加铺结构加载 50 000 次后轮辙深度如图 7、8 所示.

表 2 路面结构组合

Tab. 2 The combination of pavement structure				
厚度/cm	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4
5	SMA-13	SMA-13	SMA-13	HMAC
8	AC-20	SMA-13	HMAC	HMAC
38	旧水泥混凝土板			
18	二灰稳定碎石			
18	二灰稳定砂砾			

从图 7、8 中可以看出,4 种结构组合下轮辙深度随速度的增加呈幂指数函数降低,尤其是在低于 10 m/s 的低速慢行状态下,其永久变形量处于较高水平. 4 种路面结构组合中,随着面层材料模量的增加,抗车辙能力也逐渐增强. 抗车辙性能最好的是组合 4,采用双层 HMAC,但目前我国对 HMAC 的研究还不够成熟,没有成熟的经验可以借鉴,在机场道面结构设计时并没有得到非常多的应用<sup>[12-13]</sup>. 抗车辙能力最差的为组合 1,是目前最常用的结构组合形式,采用 SMA-13 + AC-20,具有良好的耐磨性和易修复性,相对 HMAC 来说,施工和设计方法较为成熟,并且,其加铺结构的永久变形累积量较小,可以满足跑道的使用

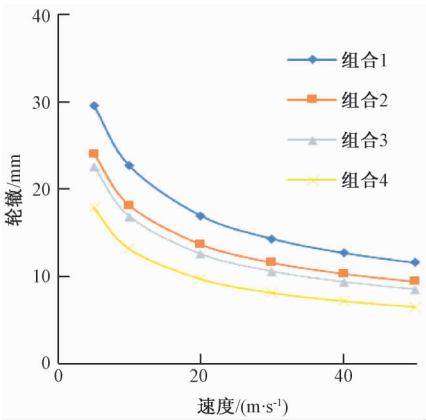


图 7 不同结构组合下轮辙随速度变化规律  
Fig. 7 The change law of rut with speed when structure combinations are different

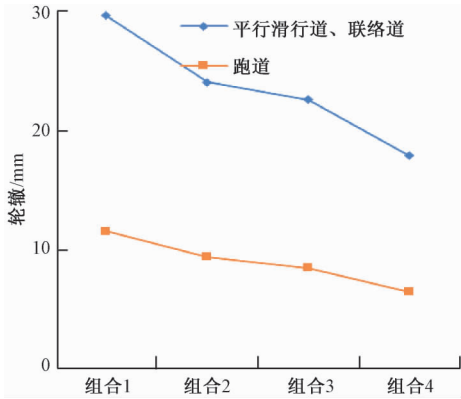


图 8 不同结构组合下飞行区不同区域轮辙深度  
Fig. 8 The depth of rut at different flight area when structure combinations are different

要求,因而被广泛的应用<sup>[14]</sup>.但是并不能满足高温、重载、低速三相耦合作用下的行驶状态,平行滑行道和联络道上轮辙病害问题依然严重.因此,在加铺结构设计时,可以通过改变材料,提高其下面层模量,降低其累积变形量.

沥青加铺层厚度从 11 cm 增大到 21 cm 后(按 2 cm 递增),飞行区不同厚度时轮辙随速度变化和不同区域永久变形规律如图 9、10 所示.

从图 9、10 可以看出,随着厚度的逐渐增大,加铺结构轮辙变形逐渐增大并趋于平缓.厚度的增大对平行滑行道及联络道永久变形增加较为明显,对跑道则相对较小.可见,加铺层宜设置在 13~15 cm 范围内,不增加成本的同时可以满足跑道的要求,现有的加铺结构厚度基本满足.飞机在平行滑行道、联络道上行驶时,则需要考虑与跑道行驶状态的差异,加铺层厚度尽量不超过 13 cm,以降低轮辙病害发生概率<sup>[15]</sup>.

逐渐增加下面层模量或减小下面层厚度时,不同结构组合,在荷载作用 50 000 次后,平行滑

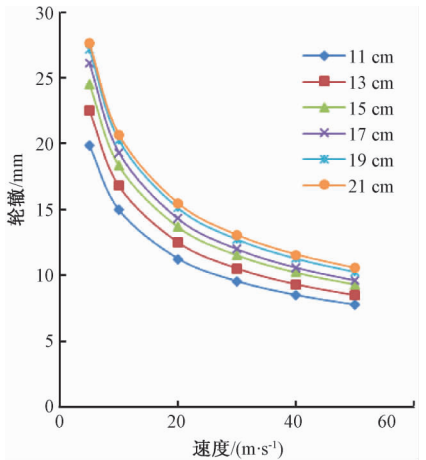


图 9 不同厚度下轮辙随速度变化规律  
Fig. 9 The change law of rut with speed at different thickness

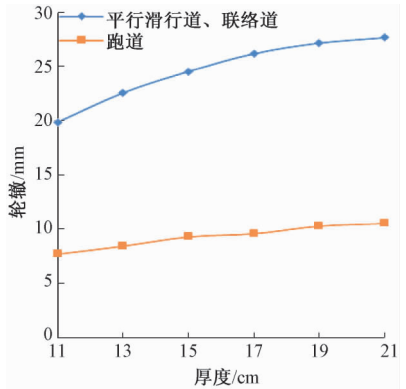


图 10 轮辙随厚度变化规律  
Fig. 10 The change law of rut with thickness

行道、联络道轮辙与跑道轮辙深度的关系如表 3 所示<sup>[16]</sup>.

表 3 不同结构组合下不同区域轮辙深度关系  
Tab. 3 The relation of rut depth at different area when structure combinations are different

结构组合	平行滑行道、联络道轮辙与跑道轮辙倍数关系
5cmSMA + 8cmAC	2.57 倍
5cmSMA + 8cmHMAC	1.96 倍
5cmSMA + 6cmHMAC	1.72 倍
5cmHMAC + 6cmHMAC	1.38 倍

表 3 进一步表明,采用不同的加铺厚度和模量组合,轮辙深度的差异非常大.因此,加铺结构设计时,通过控制轮辙深度的方式,控制飞行区不同区域加铺结构的厚度和模量是非常有必要的.对于平行滑行道、联络道,采用高模量沥青混合料可以显著降低荷载长时间作用下产生的轮辙;在满足结构性能或功能要求的前提下,可适当降低平行滑行道、联络道加铺层厚度来降低其使用期

内永久变形。

3 差异设计方法与设计指标

机场跑道沥青加铺层结构在大型飞机的反复作用和自然因素的不断影响下逐渐出现损坏,特别是在平行滑行道和联络道低速行驶时,大大加大了重载作用时间,致使轮辙病害快速出现和发展。通过上述对剪应力、剪应变和永久变形的分析可知,可以通过控制荷载、温度、速度等因素,最大剪应力和最大轮辙深度的方法,缓解平行滑行道和联络道上轮辙病害尤为严重的问题。因此,在现有设计方法的基础上提出以容许剪应力及容许轮辙为验算指标的飞行区不同区域沥青加铺结构差异设计方法<sup>[17]</sup>。

3.1 剪应力验算指标

沥青加铺层在荷载反复作用下,层内剪应力超过了其极限状态,产生剪切流动变形,所以需要控制加铺层内的剪切应力<sup>[18-19]</sup>。而容许剪应力则是根据其所用材料的极限抗剪强度  $\tau_s$  得到的,二者之间的关系为:

$$\tau_R = \frac{\tau_s}{K_s}, \tag{1}$$

式中: $K_s$  为道面结构安全系数,与设计使用期荷载作用次数和所用材料有关。

由此可得,加铺结构在设计使用期内荷载反复作用下不同区域应满足以下控制指标,

$$\begin{cases} \tau_P \leq \tau_{RP} \\ \tau_L \leq \tau_{RL}, \\ \tau_H \leq \tau_{RH} \end{cases} \tag{2}$$

式中: $\tau_{RH}$ 、 $\tau_{RL}$ 、 $\tau_{RP}$  分别为平行滑行道、联络道及跑道容许剪应力。

3.2 轮辙验算指标

永久变形计算方法是各种机型的荷载作用次数转化为设计机型的作用次数,得出设计飞机在设计使用期内荷载作用的总的作用次数,然后结合飞行区不同区域的行驶特性得出不同区域的作用时间,再利用蠕变曲线得出不同区域的总轮辙量,最后看轮辙量是否满足轮辙控制指标的要求,

$$\begin{cases} RD_H \leq [RD]_{RH} \\ RD_L \leq [RD]_{RL}, \\ RD_P \leq [RD]_{RP} \end{cases} \tag{3}$$

式中: $RD_H$ 、 $RD_L$ 、 $RD_P$  分别为滑行道、联系道、跑道总轮辙量; $[RD]_{RH}$ 、 $[RD]_{RL}$ 、 $[RD]_{RP}$  分别为滑行道、联络道、跑道容许轮辙量。

3.3 设计流程

机场旧水泥混凝土道面沥青加铺结构不同区域差异设计流程如图 11 所示。

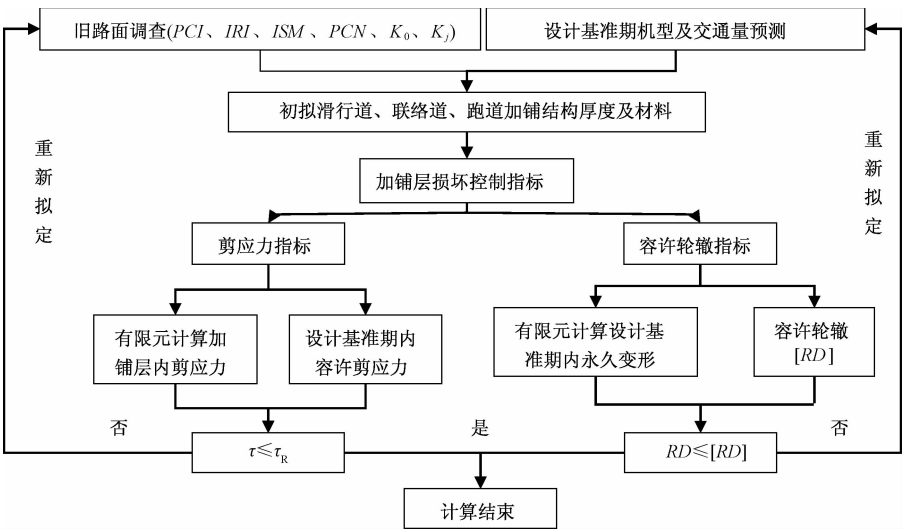


图 11 机场加铺结构差异化设计流程

Fig. 11 The differential design process of airport asphalt overlay structure

4 结论

(1)在重载、高温条件下,平行滑行道和联络道上低速行驶,加大荷载作用时间,致使轮辙病害迅速发生和发展。

(2)适当提高加铺层模量、降低加铺层厚度可以减缓轮辙病害的发展。

(3)针对平行滑行道、联络道和跑道上飞机行驶特性差异,结合我国现有规范,提出以容许剪应力及容许轮辙为验算指标的飞行区不同区域沥

青加铺结构差异设计方法.

## 参考文献:

- [1] 林小平. 复杂条件下机场跑道沥青加铺层结构设计原理与方法[D]. 上海: 同济大学交通工程运输学院, 2007.
- [2] 赵鸿铎, 陈峙昂. 中美机场水泥混凝土道面加铺厚度设计方法对比分析[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 10-17.
- [3] 中华人民共和国行业标准. 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.
- [4] 李巧生, 王德荣, 李杰, 等. 水泥混凝土道面结构在多轮荷载作用下的响应分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 75-78.
- [5] 汤豆. 基于典型病害的机场旧水泥混凝土道面沥青加铺结构研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2016.
- [6] EAPA. Airfield uses of asphalt[R]. Netherlands: European Asphalt Pavement Association, 2003.
- [7] US. Department of Transportation Federal Aviation Administration. ACNo:150/5320-6D Airport Pavement Design and Evaluation[S]. Washington DC: U S Department of Transportation Federal Aviation Administration, 1995.
- [8] 刘建兰, 王朝辉, 王选仓. 旧沥青路面加铺层结构层间工作状态研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2009, 30(3): 90-93.
- [9] 蔡靖, 李岳, 孙钦刚. 温度场下的机场柔性道面转弯区轮辙规律研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(1): 186-194.
- [10] 李巧生, 任安, 李刚, 等. 应急机场沥青道面高温稳定性试验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(2): 22-24+96.
- [11] 钱振东, 孟凡奇, 曾靖. 高性能沥青混凝土机场道面结构[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 575-580.
- [12] 赵锡娟. 高模量沥青混凝土材料组成及路用性能研究[D]. 西安: 长安大学材料学院, 2009.
- [13] 胡亮. 高模量沥青混合料(HMAC-20)在徐明高速公路江苏段的应用研究[J]. 上海公路, 2017(3): 34-36.
- [14] 王福华, 吴启祥. SMA 沥青混合料应用中存在问题的改进措施[J]. 城市道桥与防洪, 2017(9): 53-56.
- [15] 李郁, 王健. 应用有限元计算机场道面结构适应厚度[J]. 公路与汽运, 2012(2): 117-120.
- [16] 袁玉卿, 刘凤利, 王选仓. 旧水泥路面沥青加铺层间防裂抗拉强度指标研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(2): 28-32.
- [17] 刘文. 机场沥青道面设计指标及方法研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2008.
- [18] 马翔, 倪富健, 顾兴宇. 复合式机场道面结构设计方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(2): 36-40.
- [19] 张晗. 水泥混凝土机场跑道沥青加铺层性能研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2016.

## Study on Regional Difference Design of Asphalt Overlay in Airport Pavement

LI Weiguang<sup>1</sup>, GUO Yang<sup>1</sup>, TANG Dou<sup>2</sup>, ZHENG Minnan<sup>3</sup>, YAN Lili<sup>4</sup>, YANG Wanyi<sup>5</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Shenzhen Branch of the First Highway Survey and Design Institute, Shenzhen 518000, China; 3. Shaanxi Transportation Vocational Technical College, Xi'an 710018, China; 4. Fushun City Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Department, Fushun 113009, China; 5. Beijing's First Road Maintenance Engineering Co., Ltd., Beijing 102613, China)

**Abstract:** According to the early partial deformation failure, which was caused by great difference of the traveling state in different flighting areas, based on ABAQUS software platform, this paper analyzed the change law of shear stress, shear strain and permanent deformation when aircraft load, temperature and driving speed were changed. It showed that the force and deformation of asphalt overlay would be in the limit under the coupling effect of three kinds of heavy load, high temperature and low speed. By reasonable design of material type combination and thickness, the early rutting of parallel taxiway and liaison road could be significantly reduced, and the service level of pavement could be improved. Thus, based on the existing design, this paper presented a design method for different regions of asphalt overlay in airport pavement, that the allowable shear stress and allowable rut for checking index.

**Key words:** airport pavement; asphalt overlay; coupling effect; shear stress (strain); rutting; differential design