

基于分时叠加的机场沥青道面结构设计方法

赵鸿铎, 邹益强, 袁捷

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 现有机场沥青道面结构设计方法以损伤的线性叠加为基础, 各结构层采用单一模量进行设计, 未考虑材料的季节变化和衰变特性。鉴于此, 提出了分时叠加的设计思想, 分阶段考虑环境因素、交通荷载和结构性能衰变对沥青道面结构层厚度的影响。基于分时叠加原理, 给出了环境因素和性能衰变影响下各层材料模量的预估模型, 建立了相应的设计指标和标准, 通过整理和对比推荐了合理的使用性能预估模型, 最终形成了完整的基于分时叠加的机场沥青道面结构设计方法。

关键词: 机场; 沥青道面; 设计方法; 分时叠加; 环境因素
中图分类号: V351.11 **文献标志码:** A

Structural Design Method of Airport Asphalt Pavements Based on Time-sharing Cumulation

ZHAO Hongduo, ZOU Yiqiang, YUAN Jie

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

Abstract: The conventional design method of airport asphalt pavement doesn't take seasonal changes and decay characteristic into account, as a result, the linear cumulation based on the structure calculation with each structure layer using a single value of modulus is unreasonable. Therefore, the idea of time-sharing cumulation is proposed to design asphalt pavements in different periods by taking the impacts of environmental factors, traffic loads and performance deteriorating on the design of airport asphalt pavement into consideration. Furthermore, based on the principle of time-sharing cumulation, they are discussed as well, including modulus prediction models for different materials, design index and standard and performance prediction models to form a completely structural design method of asphalt concrete airport pavements based on time-sharing cumulating which overcomes the shortcomings of the conventional method.

Key words: airport; asphalt pavement; design method; time-

sharing cumulation; environmental factors

现有的力学-经验型机场沥青道面结构设计方法, 一般以弹性层状体系为理论基础, 并假设整个设计使用期内, 各结构层的材料参数单一不变, 交通量对道面的损伤可线性叠加。在设计时往往以最不利的状态进行考虑, 有时也对设计结果进行经验性的环境影响修正。

道路领域相关研究表明, 在不同的环境条件下, 路面各结构层材料参数存在较大差异, 环境因素考虑得准确与否对路面设计结果和使用性能的影响不容忽视^[1-4]。机场道面设计和路面设计存在相似性, 因此有必要在道面设计时合理地考虑环境因素和道面结构性能衰变的影响。鉴于此, 本文提出分时叠加的思想, 即分阶段地进行道面结构设计, 每一设计阶段分别考虑环境因素、交通荷载和道面结构性能衰变的影响, 以期实现对现有设计方法的调整和完善。

1 基本思路

对特定区域而言, 环境因素(温度、湿度)的变化具有一定的随机性, 但从长期观测的角度看, 其又表现出很强的规律性, 一般呈现出季节性波动, 而道面结构受环境因素的直接影响, 其材料和结构性能也相应变化。其中, 路基和粒料层的模量值与湿度紧密相关, 随着一年干湿循环变化, 其模量值也表现出明显的周期性变化。如东北地区某段黏性土路基的测试结果表明^[5], 在最不利的五月, 土基含水量为 28.5%, 对应回弹模量为 17.2 MPa; 干燥的十月土基含水量为 10.1%, 回弹模量达到 46.8 MPa, 为前者的 2.7 倍。沥青混合料模量是温度、加载频率和混合料特性的函数, 不同区域、不同时间、不同温度将

收稿日期: 2013-08-23

第一作者: 赵鸿铎(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为机场工程。E-mail: hdzhao@tongji.edu.cn

通讯作者: 袁捷(1971—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为机场工程。E-mail: yuanjie@tongji.edu.cn

导致沥青混合料呈现不同的力学特性.炎热的夏季,沥青混合料模量较低,其抗疲劳开裂性能得到提高,但抗车辙能力迅速衰退,而在寒冷的冬季则表现出相反的趋势.半刚性基层虽然受环境因素变化的影响相对较小,但其在使用过程中性能会发生明显的衰变,主要表现为在重复荷载作用下,其模量呈现三个衰减阶段:加速衰减阶段、稳定降低阶段和破坏阶段^[6].

传统道面结构设计方法将整个使用期作为一个设计阶段,每个结构层只采用一个模量值进行计算,未考虑材料的季节变化和衰变特性.在确定土基和粒料层的模量时考虑了所处自然区划的影响,但并没有细致地考虑湿度变化对材料模量的影响,而是偏安全地采用最不利条件进行设计.而沥青层一般采用统一温度下的模量值表征其力学性质,这并不能反映道面实际工作中在较大范围内变化的温度的影响,同时缺少对不同地区气候条件差异的考虑,有可能导致气候条件不同的地区得到相同的设计结果.另外,半刚性基层选用室内试验测定的模量值进行设计,该模量值表征的是材料完好无损时的力学性质,然而实际工作中,半刚性基层的性能往往会发生衰变.按照传统方法的计算结果,任何时间段内同等交通量对道面结构造成的损伤是相同的,然而实际使用中各结构层不同的模量组合,将导致结构力学响应的不同,也势必造成损伤的差异性.如果重交通期与道面结构最软弱期重叠将加速道面的破坏,而传统的设计方法无法对其进行考虑.

鉴于传统方法的不足,本文提出分时叠加的设计思想.设计过程中,将整个使用期划分为多个设计阶段,每个设计阶段分别考虑温度、湿度和结构使用性能衰变等因素的影响,合理地确定各结构层材料参数,并结合各个阶段内的交通荷载条件,确定道面结构损伤状况,最终通过累加得到道面总的损伤状况.

基于分时叠加的设计方法在考虑环境因素时关键在于分析环境的变化规律,并合理地表征该变化对沥青道面材料和结构的影响,然后相应地进行设计阶段的划分.由于各结构层材料模量为沥青道面结构设计时的重要参数,而土基、粒料层和沥青混凝土面层材料模量受外界环境的影响显著,因而一般根据这三者的模量变化进行设计阶段划分.原则上,将模量变化不大的时间段划为一个设计阶段,该阶段内模量可视为定值,因此设计阶段的划分有两种模式:按定时长划分,以固定时长(例如半个月或者一个月)划分设计阶段;按各层材料模量变化划分,

先按各层材料模量变化情况各自划分设计阶段,然后整合协调得到整个结构的设计阶段划分结果.

2 设计流程

基于分时叠加的道面结构设计方法的基本流程如图1所示.

在该设计方法中,应首先根据已掌握的交通条件、环境气候因素、土基条件和材料特性初步拟定沥青道面结构,进而进行设计阶段的划分.根据各设计阶段内运行机型及架次的预测,结合各结构层材料参数的预测,利用有限元软件构建沥青道面力学响应模型,按照建立的设计指标体系提取力学响应量,并代入使用性能预估方程计算设计阶段内各机型的允许荷载重复作用次数.另一方面,利用运行机型及架次的预测结果和各机型的横向分布曲线,计算各设计阶段内各机型的预期荷载重复作用次数.由各机型的预期荷载重复作用次数和允许荷载重复作用次数,计算各个阶段道面结构累积疲劳损伤.完成所有设计阶段后,若总的累积疲劳损伤处于合理范围内,则所拟道面结构满足设计要求,否则应对所拟结构进行调整,直到满足要求为止.

本文提出的沥青道面结构设计方法需要解决的核心问题包括:不同环境条件下材料参数的确定、沥青道面结构设计指标的建立、使用性能预估方程的选取和预期荷载重复作用次数的计算.论文将围绕前三个方面进行详细说明.

3 基于分时叠加法的材料参数

道面结构在使用过程中,不仅直接承受交通荷载的重复作用,同时也承受着环境因素的显著影响.本文重点考虑湿度对土基和粒料类材料回弹模量的影响,温度对沥青混合料模量的影响以及使用性能衰变过程中半刚性基层材料回弹模量的变化,从而为基于分时叠加的机场沥青道面结构设计提供材料基础参数.

3.1 土基和粒料类材料

基于分时叠加的设计方法要求在设计时考虑该类材料模量值的变化,按其实际湿度状况选取相应的模量值.具体做法为选用饱和度作为湿度变量,先确定其在最佳饱和度(最大干密度和最佳含水率时的饱和度)条件下的模量值,然后根据实际饱和度进行调整.

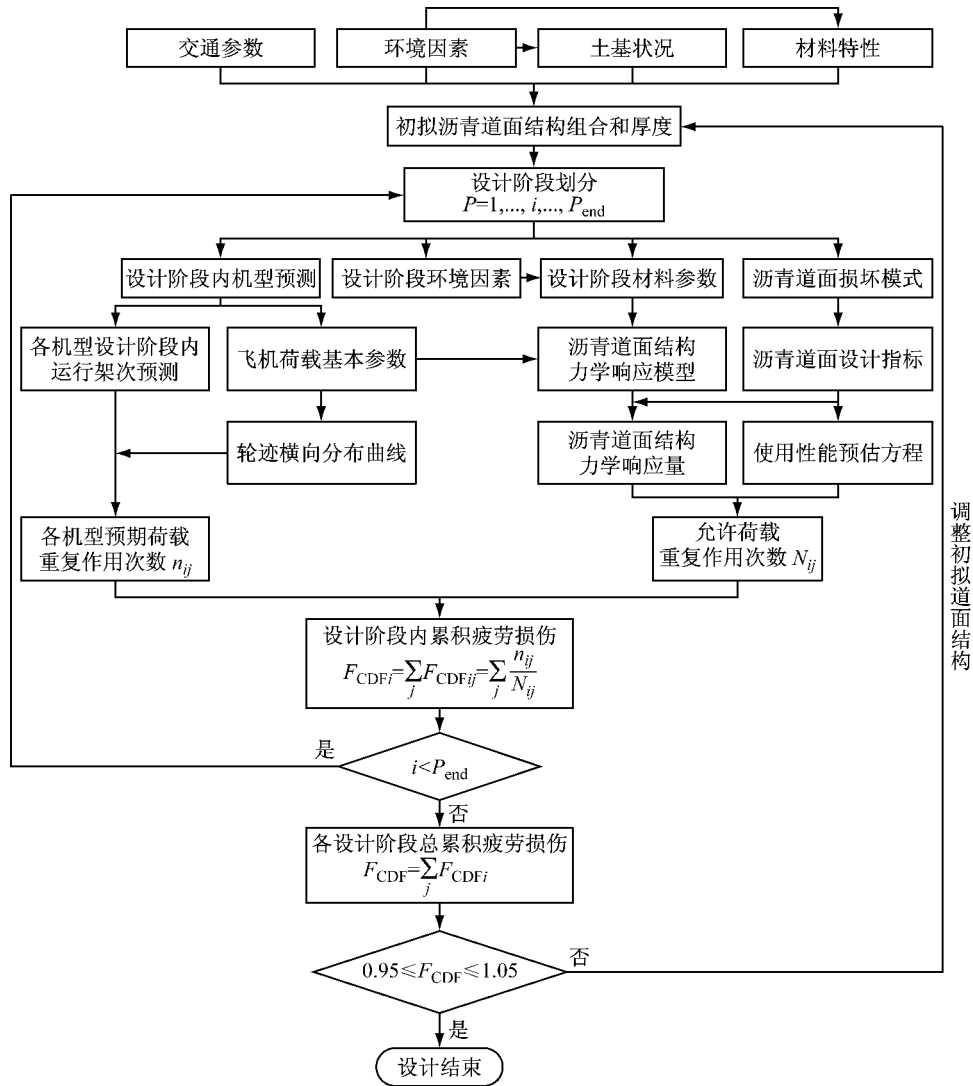


图 1 沥青道面结构设计分时叠加法基本流程

Fig. 1 Basic procedure of structural design method of asphalt concrete airport pavement based on time-sharing iteration

国内外研究表明,回弹模量预估模型应既能考虑侧限影响,又能考虑剪切影响.基于上述要求,本文推荐选用 NCHRP 1-28A^[7]三参数模型进行最佳饱和度条件下回弹模量预估,如式(1)所示.

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (1)$$

式中: M_R 为回弹模量; θ 为体应力, $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力; τ_{oct} 为八面体剪应力, $\tau_{oct} = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} / 3$; k_i 为回归常数, $k_1, k_2 \geq 0, k_3 \leq 0$; p_a 为标准大气压.

以往建立的路基土回弹模量和湿度关系的预估模型大多较为复杂,难以在实践中推广^[8].鉴于此,本文采用“湿度调整系数”对不同湿度下的回弹模量进行调整,从而确定实际湿度条件下的土基回弹模量.通过调研相关文献发现,现有的多种湿度调整系

数预估模型中, NCHRP 1-37A 模型^[9]由于具有较好的室内试验基础,且经过美国 LTPP-SMP(Long Term Pavement Performance-Seasonal Monitoring Program)大量数据验证,具有良好的可靠性和适用性,因而予以采用,如式(2)所示.

$$\lg \frac{M_R}{M_{R(opt)}} = a + \frac{b-a}{1 + \exp\left[\ln\left(-\frac{b}{a}\right) + k_s(S - S_{opt})\right]} \quad (2)$$

式中: M_R 为当饱和度为 S 时的回弹模量, MPa; $M_{R(opt)}$ 为在最大干密度和最佳含水率条件下的回弹模量, MPa; S_{opt} 为在最大干密度条件下的饱和度, %; a 为 $\lg(M_R/M_{R(opt)})$ 的最小值; b 为 $\lg(M_R/M_{R(opt)})$ 的最大值; $S - S_{opt}$ 为饱和度的变化值,以小数计; k_s 为回归系数.

美国路面设计指南^[9]利用已有文献中的数据回

归分析后得到各项参数值. 对粗粒土, $a = -0.312$, $b = 0.3$, $k_s = 6.816$; 对细粒土, $a = -0.583$, $b = 0.4$, $k_s = 6.132$.

3.2 沥青混合料

分时叠加法在进行机场沥青道面结构设计时要求合理考虑温度变化对沥青混合料模量的影响. 事实上, 在进行沥青路面设计时, 最新的德国力学-经验法以及美国沥青路面设计指南等都对温度进行了考虑, 并将沥青混合料动态模量作为设计输入参数^[10], 本文将加以参考.

沥青混合料动态模量确定的具体过程为: 首先寻找或建立合适的模型较准确地预测沥青道面结构内温度场的分布与变化, 然后利用试验得到的动态模量主曲线及时间-温度转化因子, 结合已经确定的路面结构内不同深度、不同时间的温度, 通过等效厚度法计算荷载作用频率, 再采用循环迭代的方法计算相应的动态模量.

确定沥青道面结构内温度场的方法主要分为解析法和经验预估法^[11]. 前者利用气象学和传热学的基本原理采用数值分析方法建立沥青道面温度场预估模型, 目前众多有限元软件均能够实现这一功能; 后者则根据实测数据和气象资料采用回归分析方法建立道面温度场和环境之间的定量关系.

不同温度下沥青混合料动态模量采用 Witczak 等提出的 Sigmoidal 函数^[9]确定, 其形式如式(3)所示.

$$\lg |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \lg t_r)} \quad (3)$$

式中: $|E^*|$ 为沥青混合料动态模量; t_r 为在参照温度 T_r 时的加载时间; δ, α 为回归系数, 其中 δ 为动态模量的最小值, $\delta + \alpha$ 为动态模量的最大值; β, γ 为描述曲线形状的参数.

式(3)中的 t_r 与时间-温度转化因子存在定量关系, 如式(4)所示.

$$\lg t_r = \lg t - \lg a(T) \quad (4)$$

式中: t_r 为在参照温度 T_r 时的加载时间, s ; t 为在给定温度 T 时的加载时间, s ; $a(T)$ 为时间-温度转化因子.

通过以上关系式, 在给定的荷载频率下, 能够求得任意温度下的动态模量. 同时, 赵延庆等^[12]研究指出, 同一温度条件下, 沥青材料静态模量大致与动态模量主曲线中对应于荷载频率为 0.01~0.10 Hz 的动态模量相当, 可以此进行动态模量的修正.

3.3 半刚性基层材料

分时叠加法认为, 为使路面和道面结构设计更加合理, 必须准确地把握半刚性基层的模量变化.

目前, 半刚性基层模量的选用方法大致可以分为三种: 单一模量法、两阶段模量法和衰变模量法. 其中, 单一模量法是指在设计时不考虑半刚性基层材料在使用过程中的模量衰变, 这与本文的研究思路不符, 不予考虑. 两阶段模量法^[13]认为, 半刚性材料在使用过程分为疲劳开裂前和疲劳开裂后阶段, 前一阶段又包括材料完好阶段和材料微裂缝阶段, 后一阶段也可分为裂缝扩展阶段和材料碎裂阶段, 每一阶段都给出了合理的模量区间, 如表 1 所示.

表 1 南非沥青路面设计基层材料两阶段模量

Tab.1 Modulus of base course materials used in asphalt concrete pavement design in South Africa

半刚性基层类型	基层材料模量/MPa				无侧限抗压强度/MPa
	疲劳开裂前		疲劳开裂后		
	材料完好	微裂缝阶段	宏观裂缝阶段	材料碎裂阶段	
水泥处治级配碎石	6 000~30 000	2 500~3 000	800~1 000	400~600	6~12
水泥处治天然碎石	3 000~14 000	2 000~2 500	500~800	300~500	3~6
水泥处治天然碎石	2 000~10 000	1 000~2 000	500~800	200~400	1.50~3.00
天然碎石	500~7 000	500~2 000	400~600	100~300	0.75~1.50

衰变模量法以 AASHTO2002 (The American Association of State Highway and Transportation Officials) 为代表, 其在结构计算时认为半刚性基层材料随时间而衰变. 设计时以 2~4 周为一个分析段, 不同分析段选用相应地模量计算力学响应量. 模量随疲劳损耗而下降的关系如式(5)所示.

$$E_h(D) = E_{b,max} + \frac{E_{b,max} - E_{b,min}}{1 + \exp(-4 + 14D)} \quad (5)$$

式中: $E_h(D)$ 为与半刚性基层材料疲劳损耗率 D 对

应的模量值; $E_{b,max}$ 为半刚性基层材料完好时的最大模量值; $E_{b,min}$ 为半刚性基层材料完全损坏后的最小模量值.

两阶段模量法在南非的运用已经相当成熟, 但在我国尚缺乏经验, 对于模量衰变各阶段的特征和模量研究也不多, 还未达成统一意见. 而模量衰变法定义比较明确, 易于直观理解, 同时公式在使用时只要求知道模量的最大值和最小值, 各阶段的疲劳损耗率也有对应的算法, 因此本设计方法将参照执行.

4 设计指标和标准

在充分调研国内外设计方法资料的基础上,结合我国的基本情况,确定了分时叠加法的设计指标体系,并提出了相应的设计标准。

4.1 设计指标

机场沥青道面结构设计主要控制荷载重复作用下的道面结构性损坏,通过大量的机场损坏调查和资料调研,认为合理的设计损坏模式为:对柔性基层沥青道面结构采用面层疲劳开裂和轮辙,而对半刚性基层沥青道面结构采用基层疲劳开裂和轮辙. 对应于设计损坏模式构建适合机场沥青道面结构设计的指标体系:对于柔性基层沥青道面结构,面层的疲劳开裂通过面层底水平拉应变控制,道面轮辙通过土基顶面竖向压应变控制,设计时均采用累积损伤设计方法;对于半刚性基层沥青道面结构,半刚性基层疲劳开裂通过(底)基层底水平拉应力控制,道面轮辙通过沥青层永久变形控制,设计时前者采用累积损伤法,后者则控制容许永久变形量;同时,为了控制水平荷载作用下沥青路面的剪切破坏,以飞机制动荷载作用下的沥青面层最大剪应力作为验算指标,采用容许应力法进行验算。

4.2 基于损伤分时累积的疲劳开裂控制

累积损伤因子(cumulative damage factor) F_{CDF} 是道面在各个设计阶段各种机型作用下所受损伤程度的表征,可通过计算荷载重复作用次数和荷载允许重复作用次数的比值获得. 累积损伤法以 F_{CDF} 为基础,并通过控制 F_{CDF} 的大小间接地控制道面的使用状况。

基于分时叠加的沥青道面结构设计方法在利用累积损伤法进行疲劳开裂控制时,需要先计算得到各设计阶段内各机型作用下的疲劳损伤因子 F_{CDFij} , 然后累积得到各设计阶段的累积疲劳损伤因子 F_{CDFi} , 最后计算得到整个设计使用期总的累积疲劳损伤因子 F_{CDF} , 如式(6)所示。

$$\begin{aligned} F_{CDFij} &= \frac{n_{ij}}{N_{ij}}, \\ F_{CDFi} &= \sum_{j=1}^n F_{CDFij}, \\ F_{CDF} &= \sum_{i=1}^m F_{CDFi} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: n_{ij} 为第 i 个设计阶段第 j 种飞机的预期重复作用次数; N_{ij} 为第 i 个设计阶段第 j 种飞机的允许重复作用次数,由相应阶段性能预估方程得到; F_{CDFij} 为

第 i 个设计阶段第 j 种飞机作用下的疲劳损伤; F_{CDFi} 为第 i 个设计阶段累积疲劳损伤; m, n 分别为设计阶段总数和飞机种类总数。

道面结构设计采用 F_{CDF} 作为指标控制损坏时,以 F_{CDF} 的大小是否接近 1 来判定设计结构的合理性. 在实践中认为 F_{CDF} 处于 0.95~1.05 范围内即认为设计结果是合理的。

由 F_{CDF} 的计算方法和过程可知,基于损伤分时累积的疲劳开裂控制的核心问题为任意阶段任意飞机荷载作用下疲劳损伤因子 F_{CDFij} 的计算,这需要获得该设计阶段内该机型飞机荷载的重复作用次数和允许重复作用次数,前者通过飞机的轮迹横向分布和飞机的运行架次能够合理解决,而后者则需要建立相应于各设计指标的使用性能预估方程,代入飞机荷载作用在该设计阶段的道面结构模型的力学响应值后进行求解. 在获取飞机荷载重复作用次数的前提下,使用性能预估方程的选取成为计算 F_{CDFij} 的关键。

4.2.1 柔性基层沥青道面

用于柔性基层沥青道面面层疲劳开裂控制的预估模型主要包美国 FAA (Federal Aviation Administration) 模型、美国陆军兵团 UFC (Unified Facilities Criteria) 模型、Berkeley 模型和荷兰 Pavers[®] 模型. 后三种模型均是在室内试验结果的基础上建立起来的,而 FAA 模型建立了允许覆盖次数和面层底水平拉应变和沥青混凝土模量之间的关系,其数据来源于 Heukelom 和 Klomp 的临时室内疲劳试验和 NAPTF (National Airport Pavement Test Facility) 足尺试验,并随着 NAPTF 足尺试验的深入不断修正,能够较好地反映机场沥青道面的受力特点和性能变化,因此建议采用 FAA 模型对柔性基层沥青道面面层疲劳开裂进行控制,如式(7)所示。

$$\lg C = 2.68 - 5 \lg \epsilon_b - 2.665 (\lg E_A + 2.1617) \quad (7)$$

式中: C 为疲劳损坏时的覆盖次数; ϵ_b 为面层底面最大水平拉应变, $m \cdot m^{-1}$; E_A 为沥青混凝土弹性模量, MPa。

4.2.2 半刚性基层沥青道面

针对半刚性基层疲劳开裂的特征和机理,其使用性能预估模型可采用半刚性基层底面的最大拉应力或应变与荷载重复作用次数的经验关系表示. 目前我国沥青道面半刚性基层主要采用贫混凝土或水泥处治材料,一般采用应力强度比方程作为我国机

场半刚性基层沥青道面设计方法的基层疲劳开裂的控制指标,如式(8)所示。

$$\frac{\sigma_t}{f_r} = a - b \lg N_f \quad (8)$$

式中: σ_t 为弯拉应力,MPa; f_r 为弯拉强度,MPa; N_f 为荷载重复作用次数; a, b 为与材料性质相关的试验参数。

对于贫水泥混凝土,英国 Brown 等得到的疲劳试验参数为 $a=1.137, b=0.077$;比利时 Cauwelaert 等得到试验参数为 $a=1.0, b=0.0714$ 。而对于水泥处治材料,南非 Otte 等建议采用试验参数 $a=1.0, b=0.11$;美国 Dempsey 则认为 $a=0.972, b=0.0825$ 。

4.3 基于损伤分时累积的轮辙控制

对于柔性基层沥青道面,轮辙通过土基顶面竖向压应变进行控制,其性能预估方程的形式与疲劳方程的形式相似,同样以某一应力(应变)级位下的容许作用次数表征,因而在进行轮辙控制时依然采用累积损伤法进行设计,其计算方法和过程与疲劳开裂控制类似。

柔性基层沥青道面轮辙通过土基顶面竖向应变进行控制,在机场沥青道面力学-经验法中,应用最为广泛的为 Dormon 等建立的模型,如式(9)所示。

$$\epsilon_z = aN^{-b} \quad (9)$$

式中: ϵ_z 为土基顶面容许竖向压应变; N 为荷载重复作用次数; a, b 为回归系数。

在 Dormon 建立的模型基础上,衍生出了诸如美国 FAA1.2 模型、FAA1.3 模型、UFC 模型、澳大利亚 APSDS (Airport Pavement Structural Design System) 模型、荷兰 Pavers[®] 模型等其他众多模型。出于和面层疲劳开裂模型选择的相同原因,本文建议选择美国 FAA1.3 模型用于柔性基层沥青道面的轮辙控制,如式(10)所示。

$$\text{当 } C \leq 12\,100 \text{ 时, } C = \left(\frac{0.004}{\epsilon_v} \right)^{8.1}$$

$$\text{当 } C > 12\,100 \text{ 时, } C = \left(\frac{0.002\,428}{\epsilon_v} \right)^{14.21} \quad (10)$$

式中: C 为道面在损坏时能承受的覆盖次数; ϵ_v 为土基顶面的竖向压应变, $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

对于半刚性基层沥青道面,由于高强度的基层能够提供足够的支撑,轮辙只限于沥青面层。仅产生于沥青面层的轮辙预估方程的形式一般表示为一定荷载作用次数与应力(应变)级位下轮辙量的对应关

系,因此不能沿用累积损伤法进行控制。该条件下的做法为将不同阶段不同飞机作用下产生的轮辙量进行叠加,计算总轮辙量,并控制其不大于容许轮辙量,如式(11)所示。

$$D_R \leq [D_R] \quad (11)$$

式中: D_R 为总轮辙量,mm; $[D_R]$ 为轮辙控制标准,mm。

沥青面层轮辙的表达形式主要有应变表达形式和应力表达形式,而基于分时叠加的设计方法尝试考虑环境因素对道面结构的影响,因此在模型选择时不仅关注模型的数据来源,形式的简易程度,参数的合理性以及模型的拟合精度,还需关注模型是否能够反映轮辙的发展与时间和温度的关系。

出于上述考虑,在基于分时叠加的设计方法中建议使用苏凯^[14]提出的预估模型。该模型基于“亚变形叠加”的思想,经过大量室内车辙试验和数值模拟,并采用加速加载环道试验的实测数据标定得到,如式(12)所示。

$$D_R = 0.3572(1 + L_p) \sum_{i=1}^n 10^{-5.881} \cdot T_i \left(\frac{0.58}{v} N \right)^{0.743} \left(\frac{\tau_i}{[\tau_i]} \right)^{0.472} \quad (12)$$

式中: D_R 为沥青面层总轮辙量,mm; L_p 为侧向隆起系数; n 为沥青亚层总数; T_i 为沥青道面第 i 亚层温度,℃; v 为飞机通过速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; N 为荷载重复作用次数; τ_i 为第 i 亚层沥青内部最大剪应力,MPa; $[\tau_i]$ 为第 i 亚层沥青材料抗剪强度,MPa。

4.4 基于容许应力的分时剪切破坏控制

道面在水平荷载作用下产生较大的水平剪应力可能导致道面发生剪切破坏,同时水平荷载也可能导致道面表面的推挤、拥包等病害。由于目前尚缺乏关于道面剪切破坏和推挤、拥包等病害的产生机理和控制方法的相关理论和试验,本方法在控制道面剪切破坏时暂采用容许应力法,要求道面各个设计阶段在各种飞机减速制动荷载作用下产生的沥青面层最大水平剪应力不大于沥青材料的抗剪强度,如式(13)所示。

$$\tau \leq [\tau] \quad (13)$$

式中: τ 为沥青面层最大水平剪应力,MPa; $[\tau]$ 为沥青材料抗剪强度,MPa。

综上所述,用于构建本文提出的机场沥青道面结构设计方法的设计指标和标准如表 2 所示。

表 2 机场沥青道面结构设计指标和标准

Tab.2 Index and standard of asphalt concrete airport pavement design

道面结构类型	疲劳开裂		轮辙		剪切破坏	
	设计指标	设计标准	设计指标	设计标准	设计指标	设计标准
柔性基层	沥青混凝土面层或沥青稳定类基层底面的水平拉应变	$0.95 \leq F_{CDF} \leq 1.05$	土基顶面竖向压应变	$0.95 \leq F_{CDF} \leq 1.05$	沥青面层最大水平剪应力	$\tau \leq [\tau]$
半刚性基层	无机结合料稳定类(底)基层底面的水平拉应力	$0.95 \leq F_{CDF} \leq 1.05$	沥青层永久变形	$D_R \leq [D_R]$	沥青面层最大水平剪应力	$\tau \leq [\tau]$

5 结论

(1) 论文明确了环境因素对机场沥青道面设计结果和使用性能的显著影响,提出了分阶段考虑环境因素和交通荷载的分时叠加的设计思想,并提供了完整的设计流程。

(2) 在分别考虑湿度对土基和粒料类材料的影响、温度对沥青混合料的影响和半刚性基层材料使用性能衰变的影响的基础上,提出了机场沥青道面各结构层材料模量的预估模型,为建立分时叠加法的力学响应模型提供参数输入依据。

(3) 进一步明确了适合我国机场沥青道面结构设计的设计损坏模式,建立了相应的设计指标体系 and 设计标准,并通过筛选确定了使用性能预估模型,最终构建了完整的基于分时叠加的机场沥青道面结构设计方法。

参考文献:

- [1] Huang Y H. Pavement analysis and design [M]. Upper Saddle River; Pearson Prentice Hall, 2004.
- [2] Tamer M B, Christopher W R, Daryl E H, et al. Effects of using accurate climatic conditions for mechanistic-empirical pavement design [J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137: 84.
- [3] 周岚,倪富健,赵岩荆. 环境温度及荷载对沥青路面车辙发展的影响性分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(3): 42. ZHOU Lan, NI Fujian, ZHAO Yanjing. Impact of environment temperature and vehicle loading on rutting development in asphalt concrete pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(3): 42.
- [4] 赵延庆,韦武举,杨建新. 沥青混合料动态模量季节性变化规律研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(9): 43. ZHAO Yanqing, WEI Wujun, YANG Jianxin. Research on seasonal variations for dynamic modulus of asphalt mixtures [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(9): 43.
- [5] 武红娟,徐伟,王选苍. 土基模量随季节变化规律及其数值的确定[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 32. WU Hongjuan, XU Wei, WANG Xuancang. Seasonal variations of subgrade soil resilient moduli and their value determination [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 32.
- [6] 贾侃. 半刚性基层材料的疲劳特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2008. JIA Kan. Study on the fatigue performance of semi-rigid base course materials [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [7] Transportation Research Board. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures-final report [R]. Champaign: Transportation Research Board, 2000.
- [8] 龙海翔,刘涛,兰伟. 路基土回弹模量湿度调整系数研究[J]. 公路工程, 2009, 34(1): 67. LONG Haixiang, LIU Tao, LAN Wei. Study on adjusting factor of resilient modulus of subgrade soil [J]. Highway Engineering, 2009, 34(1): 67.
- [9] Transportation Research Board. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures-final report [R]. Champaign: Transportation Research Board, 2004.
- [10] 沈金安. 国外沥青路面设计方法总汇[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. SHEN Jin'an. Confluence of foreign design method of asphalt pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [11] 姚祖康. 沥青路面结构设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. YAO Zukang. Structural design of asphalt pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [12] 赵延庆,薛成,黄荣华. 沥青混合料抗压回弹模量与动态模量比较分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(12): 105. ZHAO Yanqing, XUE Cheng, HUANG Ronghua. Comparison of compressive resilient modulus and dynamic modulus of asphalt mixtures [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(12): 105.
- [13] Theyse L H, De Beer M, Rust C F. Overview of the south African mechanistic pavement design method [J]. Transportation Research Record, 2007, 1539: 6.
- [14] 苏凯. 沥青路面车辙产生机理及预估方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. SU Kai. Study for rutting mechanism and prediction in asphalt pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.