

# 飞机荷载重复作用次数的简化计算方法

赵鸿铎, 凌建明, 姚祖康

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 对力学-经验型沥青道面结构设计方法中的飞机交通荷载分析方法进行研究, 探讨了一种简化的荷载重复作用次数计算方法. 通过理论分析, 提出了以应力(应变)扩散斜率和等效宽度为中心的荷载重复作用次数简化计算概念. 双层体系的结构响应分析表明, 等效宽度是结构厚度和上下层结构相对刚度的函数. 经过回归分析, 给出了等效宽度和结构厚度的线性关系式, 回归计算结果与基于道面空间响应得到的等效宽度之间的误差在 5% 以内. 对于多层的道面结构, 建议按照力学等效的方法转换成双层结构后进行计算. 在此基础上, 提出了单轮的荷载重复作用次数计算方法, 并详细分析了横向多轮和纵向多轴的影响. 基于单机型的计算分析, 进一步扩展提出了混合交通条件下的荷载重复作用次数简化计算方法.

**关键词:** 机场; 沥青道面; 设计方法; 荷载重复作用次数; 简化方法

**中图分类号:** V 351.11

**文献标识码:** A

## Simplified Methods for Calculating Aircraft Load Repetition

ZHAO Hongduo, LING Jianming, YAO Zukang

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

**Abstract:** The paper presents a discussion on the simplified methods for calculating aircraft load repetition, which is used in mechanistic-empirical pavement design procedure. A simplified concept based on stress/strain spread angle and equivalent width is put forward as the basis of load repetition calculation. The results based on double pavement layers analysis show that the equivalent width is the function of top layer thickness and relative stiffness of the layers. Then, the simplified equations for calculating equivalent width are put forward. The width differences between simplified method and spatial response-based method are within 5%. The pavement

with more than two layers can be transferred to two layers according the equivalent approach. With the equivalent width, load repetition methods are developed for single tire, and a detailed analysis is made of the multiple tires and multiple axles as well. Furthermore, the equations with a consideration of the mixed traffic are put forward.

**Key words:** airport; asphalt pavement; design procedure; load repetition; simplified method

基于累积损伤原理(Miner 原理)的力学-经验型设计方法, 已成为现代机场沥青道面结构设计方法的发展趋势<sup>[1]</sup>. 该方法的核心是道面预期和允许荷载重复作用次数的计算. 获得荷载重复作用次数较理想的方式是基于道面结构空间响应规律, 详细考察各个应力、应变峰值出现的位置、大小和数量<sup>[2]</sup>. 然而该方法必须依赖 3 维有限元等具有空间结构响应分析能力的软件平台. 在具体的道面设计中, 由于各种条件的限制, 许多情况下无法使用相关的软件平台. 因此, 有必要提供简化的荷载重复作用次数分析方法, 为道面设计方法的工程应用提供直接参考.

国外目前采用两种荷载重复作用次数的简化计算方法: 一种以美国传统的 CBR (California Bearing Ratio) 法为代表, 仅计算道面表面的通行一覆盖率; 另一种以美国的弹性层状体系法为代表, 对飞机荷载作用下的道面结构响应按照 1:2 (粒料) 或 1:1 (稳定类材料) 的斜率扩散, 根据扩散到沥青层底或土基顶面的当量轮印来计算荷载重复作用次数<sup>[3]</sup>. 前一种方法由于仅适用 CBR 法, 计算位置与设计指标控制位置不符, 已逐步遭到淘汰; 后一种方法的概念较合理, 但是固定扩散角可能会带来较大的误差, 需要进行改进.

收稿日期: 2010-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(60776818)

第一作者: 赵鸿铎(1976—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程. E-mail: hdzhao@tongji.edu.cn

通讯作者: 凌建明(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程. E-mail: jmling01@yahoo.com.cn

本文基于应力扩散分析对一种更加合理的荷载重复作用次数简化计算方法进行了探讨.

## 1 荷载重复作用次数

随着道面结构设计方法朝着力学-经验法的发展,道面结构的力学指标成为了主要设计指标.此时在设计中关心的是特定的道面结构能够承受多少次指定响应水平的力学指标的作用.因而,在力学-经验型的道面结构设计方法中,需要把飞机通行次数转化为设计指标所对应的应力、应变等的重复作用次数.这种按设计指标定义的重复作用次数统称为荷载重复作用次数<sup>[4]</sup>.如果对应的设计指标为应力,也称为应力重复作用次数;如果对应的设计指标为应变,也称为应变重复作用次数.

## 2 简化的技术思路

当起落架位于不同的横向位置时,虽然对道面某一点会产生不同的力学响应量,但是在一定的偏移范围  $B'$  内,该点的力学响应量的值比较接近.以图 1 为例,对道面上的某点  $P$ ,轮载在位置  $a, b$  和  $c$  处产生的应变(或应力)分别为  $\epsilon, \epsilon'$  和  $\epsilon''$ .若存在某一宽度  $B$ ,在该边缘处产生的应变(或应力)  $\epsilon'$  与最大应变(或应力)  $\epsilon$  较接近,当以  $\epsilon$  来代替  $\epsilon'$  并应用宽度  $B$  内的轮迹横向分布概率进行交通荷载分析时,若得到的荷载重复作用次数与基于道面空间响应分析得到结果之间的误差在可接受范围内,则可以用  $B$  和  $\epsilon$  来简化荷载重复作用次数的计算.若假定起落架在不同位置对道面产生的道面结构响应规律相同(力学响应量的分布曲线形状相同),则轮迹的偏移宽度  $B'$  等效于应变(或应力)曲线上大小为  $\epsilon'$  的位置之间的距离  $B$ .在求得等效宽度  $B$  后,即可根据上述原则对荷载重复作用次数进行简化分析.

## 3 单轮荷载的重复作用次数

根据简化思路,等效宽度与道面结构组合、道面厚度、材料参数、荷载类型等有关.先考察单轮荷载作用下针对不同设计指标的荷载重复作用次数简化方法.

### 3.1 双层结构的等效宽度

双层结构在沥青混凝土道面中属于最简单的模式,如全厚度沥青道面就基本属于双层结构.以

A380 的单轮荷载为例,考察单轮荷载作用下等效宽度  $B$  的计算方法.假定轮印为圆形均布荷载,双层之间的接触条件为接触连续. A380 的主起落架的各项参数为:单轮荷载为 260.95 kN,轮胎压力为 1.5 MPa,单轮轮印面积为 173 966.7 mm<sup>2</sup>,圆形轮印半径为 235.3 mm,椭圆形轮印短边长为 372 mm.下面以土基顶面竖向压应变为例说明简化的过程.

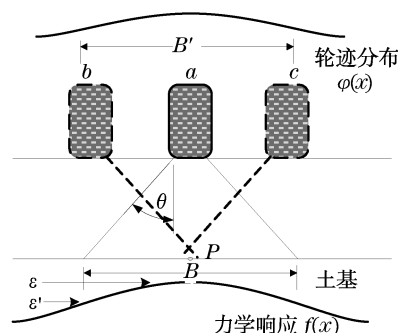


图 1 荷载重复作用次数计算简化示意

Fig.1 Concept of simplified calculation method

在 A380 单轮荷载的作用下,双层结构土基顶面竖向压应变的典型分布如图 2(上层模量  $E_1$  和土基模量  $E_0$  的比值  $E_1/E_0 = 20$ ,  $E_0 = 30$  MPa)所示.随着厚度增加最大应变值变小,横向的衰变速度也变缓,即曲线变得更加平坦.把等效宽度  $B$  边缘处产生的应变值与最大应变之间比值定义为应变比例,记为  $\Delta$ (图 3).

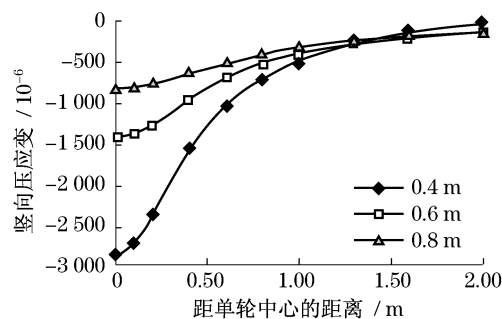


图 2 不同厚度下的土基顶面竖向压应变

Fig.2 Strain on the top of subgrade with various layer thickness

根据分析,当上层和下层的模量比相同时,即  $E_1/E_0$  相同时,具有相同的等效宽度  $B$ (表 1).在不同模量比的条件下,随着厚度的增加,等效宽度基本呈线性变化,如图 4 所示.因此等效宽度是结构厚度和上下层相对刚度的函数.为了把材料的泊松比考虑在内,把按照下式定义的模量比值,称为广义模量比:

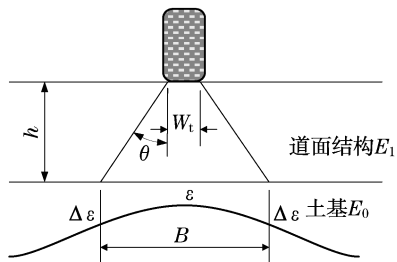


图 3 荷载的扩散示意图  
Fig.3 Concept of load spreading

表 1 不同模量比下的等效宽度  $B(\Delta=0.8, h=1.0\text{ m})$   
Tab.1 Equivalent width with various modulus

$E_0=60$		$E_0=30$	
$E_1/E_0$	$B/\text{m}$	$E_1/E_0$	$B/\text{m}$
5	0.457	10	0.486
10	0.486	20	0.519
15	0.505	30	0.540
20	0.518	40	0.554
25	0.530	50	0.566
30	0.539	60	0.575
40	0.554	80	0.591
50	0.566	100	0.603

$$\lambda = \frac{E_1/(1-\mu_1^2)}{E_0/(1-\mu_0^2)} = \frac{E_1 \leq (1-\mu_0^2)}{E_0 \leq (1-\mu_1^2)} \quad (1)$$

表 2 不同广义模量比下的等效宽度  $B(E_0=30, \Delta=0.8)$   
Tab.2 Equivalent width with various general modulus ratio ( $E_0=30, \Delta=0.8$ )

$E_1/\text{MPa}$	$\lambda$	$B/\text{m}$						
		$h=0.20\text{ m}$	$h=0.40\text{ m}$	$h=0.60\text{ m}$	$h=0.80\text{ m}$	$h=1.00\text{ m}$	$h=1.20\text{ m}$	$h=1.50\text{ m}$
60	2.62	0.270	0.314	0.412	0.506	0.610	0.728	0.903
90	3.92	0.275	0.326	0.425	0.522	0.631	0.755	0.931
150	6.54	0.283	0.343	0.444	0.547	0.663	0.798	0.975
300	13.08	0.300	0.374	0.478	0.590	0.720	0.856	1.050
600	26.16	0.324	0.411	0.519	0.643	0.789	0.928	1.143
900	39.25	0.341	0.433	0.546	0.680	0.832	0.977	1.205
1 200	52.33	0.355	0.450	0.567	0.707	0.863	1.013	1.236
1 500	65.41	0.367	0.464	0.586	0.730	0.889	1.045	1.287
1 800	78.49	0.377	0.477	0.601	0.750	0.912	1.070	1.320
2 400	104.66	0.395	0.497	0.627	0.784	0.949	1.115	1.374
3 000	130.82	0.408	0.513	0.648	0.811	0.980	1.150	1.417

针对应变比例  $\Delta=0.8$  时,不同广义模量比下的  $k$  和对应的  $\theta$  列于表 3. 根据表中的数据可进一步回归得到广义模量比  $\lambda$  和  $k$  值之间的关系为

$$k = \tan \theta = 0.133 + 0.095\lambda^{0.208}, R^2 = 0.999 \quad (3)$$

此时,双层结构的土基顶面等效宽度  $B$  可通过下式计算:

$$B = 2hk + w_t \quad (4)$$

式中: $\lambda$  为广义模量比; $\mu_1$  为上层材料的泊松比; $\mu_0$  为土基的泊松比.

当取应变比例  $\Delta=0.8$  时,不同广义模量比和不同厚度下的等效宽度如表 2 所示.

由图 4 可知,在相同模量比的条件下,等效宽度与结构厚度之间存在线性关系,对比图中曲线,可近似由图 4 中的斜率来定义图 3 中的扩散角  $\theta$ ,即

$$k = \tan \theta, \theta = \arctan k \quad (2)$$

式中: $k$  为通过对等效宽度和厚度的线性回归得到的斜率; $\theta$  为道面结构在单轮荷载作用下的应变扩散角.

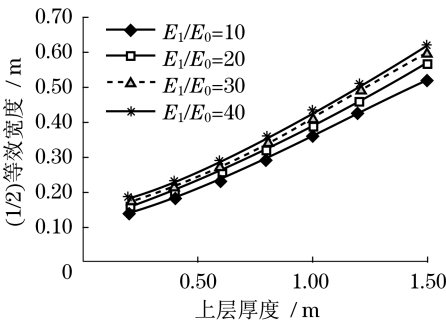


图 4 不同模量比下等效宽度与厚度的关系  
Fig.4 Relationship between equivalent width and thickness with various modulus ratio

式中: $B$  为等效宽度; $h$  为双层结构中道面结构的厚度; $k$  为扩散角的斜率; $w_t$  为轮印的宽度,即长宽比为 1:1.6 的椭圆短边长度.

对 A380 的单轮荷载,若假定轮印为椭圆形,则短边长 0.372 m,根据式(3)预估得到的等效宽度与实际计算的等效宽度之间,在厚度较薄或广义模量比较小时偏差稍大.对常用沥青混凝土而言,机场道面的厚度和广义模量比范围内,其相对误差基本都小于 5%.

表 3 不同广义模量比下的扩散斜率( $\Delta = 0.8$ )Tab.3 Spreading slop with various general modulus ratio( $\Delta = 0.8$ )

$\lambda$	$k = \tan \theta$	$\theta / (^{\circ})$	$R^2$
2.616	0.249	13.98	0.988
3.925	0.258	14.48	0.989
6.541	0.273	15.25	0.991
13.082	0.294	16.38	0.993
26.164	0.320	17.74	0.993
39.246	0.337	18.63	0.994
52.329	0.346	19.05	0.995
65.411	0.360	19.76	0.994
78.493	0.368	20.20	0.994
104.657	0.382	20.93	0.994

根据同样的原理,可分别分析以面层或基层底面的水平应力或水平应变作为控制指标时,等效宽度与广义模量比之间的关系,以及不同应变(应力)比例下的关系式。

通过对 A320, B-777 等机型的进一步分析,基于空间响应规律得到的道面荷载重复作用次数,基本与简化法  $\Delta = 0.90 \sim 0.95$  得到的值等效。因而,在工程应用中可取  $\Delta = 0.90$  进行荷载重复作用次数的简化计算。

### 3.2 多层结构的等效换算

对多层结构可以将多层结构按照一定的规则换算成双层结构之后进行荷载重复作用次数的计算。在沥青混凝土道面结构中,在考察各个设计指标时,基本都可以认为计算位置处的层间为接触连续。在层间连续条件下,谈至明教授<sup>[5]</sup>提出了多层当量为双层结构的近似计算方法,如图 5 所示。

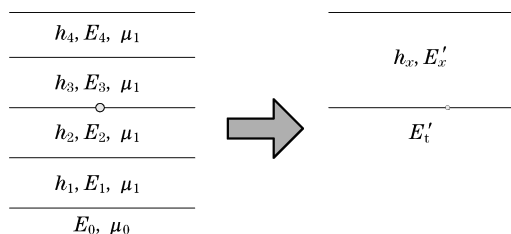


图 5 多层结构的换算示意图

Fig.5 Concept for multiple layer transfer

以图 5 为例,假定计算点在第 2 层的层底,此时可根据计算点上覆层的材料参数计算获得上覆层的广义当量模量和当量厚度。再根据下卧层的材料参数计算得到下卧层顶面的当量回弹模量。把得到的上覆层当量回弹模量,当量厚度和下卧层顶面的当量回弹模量,代入到相应的等效宽度回归公式中,即

可获得多层结构的等效宽度。

### 3.3 单轮的荷载重复作用次数

在获得等效宽度后,可根据等效宽度范围内的轮迹横向分布概率来进一步计算对应力学响应量的荷载重复作用次数。如图 6 所示,假定设计指标对应的力学响应量的等效宽度为  $B = x_2 - x_1$ ,飞机中心和道面中心重合时单轮的轮迹横向分布曲线为  $\varphi(x)$ ,飞机的通行次数为  $n$ 。则相应力学响应量的荷载重复作用次数可计算如下:

$$n_j = n \int_{x_1}^{x_2} \varphi(x) dx \quad (5)$$

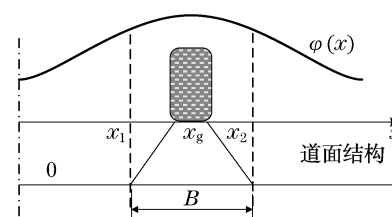


图 6 单轮荷载重复作用次数计算示意

Fig.6 Load repetition calculating for single tire

## 4 横向多轮的叠加影响

### 4.1 多轮的等效宽度

单轴双轮情况下的荷载重复作用次数可根据单轮的分析结果,按照美国联邦航空局线性叠加的概念来计算。当道面的厚度较薄或双轮的中心间距较大时,双轮在土基顶面产生的等效宽度各自独立,互不重叠(图 7),此时可直接按照式(4)计算双轮的等效宽度。

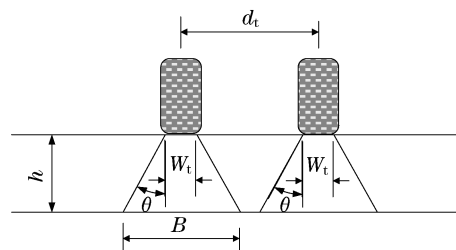


图 7 影响宽度互不重叠的等效宽度

Fig.7 Equivalent width without overlapping

当道面的厚度较厚或双轮的中心间距较小时,双轮在土基顶面产生的等效宽度发生了一定的重叠,此时可把重叠后的范围定义为(图 8)

$$B = 2hk + w_t + d_t \quad (6)$$

式中:  $d_t$  为双轮中心之间的距离;  $k$  为扩散角的斜率。

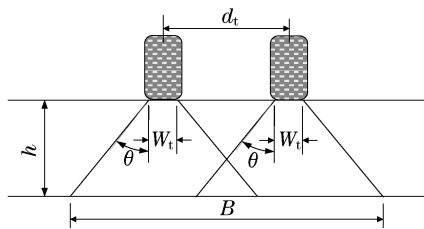


图8 影响宽度有重叠的等效宽度

Fig.8 Equivalent width with overlapping

对其他设计指标可按同样的方法处理,只需用相应的回归公式来计算扩散角斜率  $k$  即可.当横向有超过 2 个轮子存在,若单轮直接的等效宽度不重叠,则仍然按照单轮分析;若相互之间存在叠加,则可按照图 8 的概念进行叠加.

#### 4.2 多轮荷载的重复作用次数

当影响宽度有重叠时,多轮的作用可看作是单轮,荷载重复作用次数直接按照式(6)计算,其中  $\varphi(x)$  为起落架的横向分布曲线(以起落架的中心位置计算).对多轮的等效宽度范围横向不叠加的情况,则可分别按照各个轮子的轮迹横向分布曲线叠加计算.以双轮为例,可按式计算多轮荷载的重复作用次数(图 9):

$$n_j = n \left( \int_{x_1}^{x_2} \varphi_1(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} \varphi_2(x) dx \right) \quad (7)$$

式中:  $n$  为飞机的通行次数;  $\varphi_1(x)$ ,  $\varphi_2(x)$  均为机轮的横向分布曲线;  $x_1$ ,  $x_2$  分别为由等效宽度定义的起点和终点坐标.

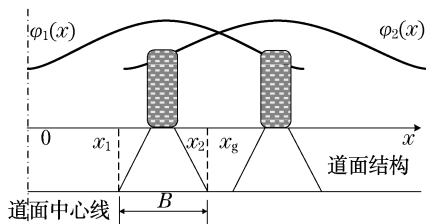


图9 多轮荷载重复作用次数计算示意

Fig.9 Load repetition calculation for multiple tires

### 5 纵向多轴的影响

若起落架为多轴,则纵向轴之间也将形成叠加效应,使道面的重复作用次数增加.此时,可先分析单轴情况下的荷载重复作用次数,利用单轴的结果乘以一个多轴系数  $\delta$  考虑多轴的作用.对双轴而言,当双轴的距离较大时,2 根轴基本呈独立作用状态,此时可以认为相当于单轴的 2 次作用,多轴系数为 2;当双轴的距离足够小时,2 根轴的作用表现出单轴的特征,此时多轴系数为 1.对于固定轴距的情况下,

当道面的厚度小于一定的值时,双轴独立作用,多轴系数为 2;道面厚度足够厚时,多轴系数为 1.因此,轴距和厚度之间存在对应关系.如图 10 所示,假定产生的扩散角仍然为单轮分析中的值,则不同厚度的多轴系数可根据下式计算:

$$\delta = 2, h \leq 0.5 h_e \quad (8)$$

$$\delta = 1, h \geq h_e \quad (9)$$

$$\delta = 3 - 2h/h_e, 0.5h_e < h < h_e \quad (10)$$

$$h_e = (d_a - l_t)/k \quad (11)$$

式中:  $h_e$  为换算厚度;  $\delta$  为多轴系数;  $d_a$  为前后轴的中心距离;  $l_t$  为轮印的长度,取长宽比为 1.6 : 1 的长边长度;  $k$  为单轮扩散角的斜率.

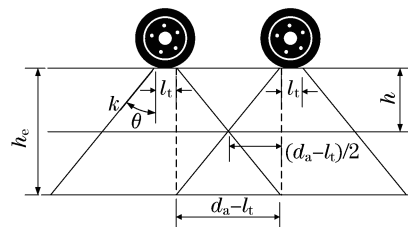


图10 双轴叠加效应示意图

Fig.10 Overlapping of two axes

当轴数超过 2 根时,按照同样的原理进行叠加,例如对 3 轴而言,厚度与多轴系数之间的关系如图 11 所示.

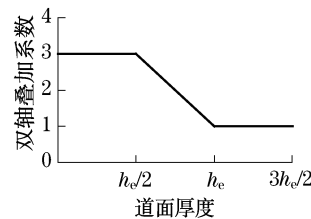


图11 3轴起落架前后轴的叠加系数

Fig.11 Overlapping index of three axes

### 6 复杂起落架的重复作用次数

对 A380, B-747, A340 等具有复合起落架构型的大型飞机而言,在计算时可分别考虑各个起落架的荷载重复作用次数,然后进行叠加.例如对 A380,分别单独考虑其中的 3 轴双轮起落架和外侧双轴双轮起落架的荷载重复作用次数,再在计算位置按照轮迹横向分布曲线进行叠加.

### 7 混合交通下的重复作用次数

由于各类飞机的起落架间距不同,通过单机型

分析得到的最大荷载重复作用次数发生位置并不相同. 为了考察混合交通作用下道面上最不利的荷载作用位置(产生累积损伤系数最大的位置), 把道面横向划分成宽 20 cm 的条带(假定各条带内受到荷载作用的程度相同), 分别考察每一条带在不同飞机作用下的累积损伤系数. 以单侧单轴双轮起落架为例, 其中心离道面中心线的距离为  $x_g$ , 对道面上的任意条带  $d_i$  (图 12), 假定其中点离道面中心线的距离为  $x_i$ , 则以  $x_i$  为中心构筑一个宽度等于等效宽度的区域. 在该区域内, 根据各个机轮的横向分布曲线, 叠加对条带的作用, 双轮机型作用下第  $i$  条带的荷载重复作用次数计算方法如下式:

$$n_{ji} = n_j \left( \int_{x_i-B/2}^{x_i+B/2} \varphi_{j1}(x) dx + \int_{x_i-B/2}^{x_i+B/2} \varphi_{j2}(x) dx \right) \quad (12)$$

式中:  $n_{ji}$  为第  $j$  类飞机在第  $i$  条带产生的荷载重复作用次数;  $\varphi_{j1}(x)$ ,  $\varphi_{j2}(x)$  均为机轮的横向分布曲线;  $x_i$  为第  $i$  条带的中心坐标.

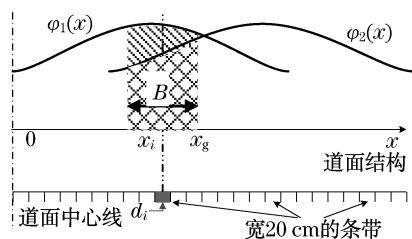


图 12 混合交通累积损伤系数计算示意  
Fig. 12 CDF calculating for mix traffic

对具有其他起落架构型的机型, 可按类似的原理计算, 并应该考虑多轴的作用. 在获得各个机型下各个条带的荷载重复作用次数后, 对应所需考察的设计指标, 根据该机型作用下的最大力学响应量和相关的预估模型, 可获得各个机型作用下每个条带的累积损伤系数, 如下式:

$$D_{ji} = n_{ji} / N_j \quad (13)$$

式中:  $D_{ji}$  为第  $j$  类飞机在第  $i$  条带产生的损伤系数;  $N_j$  为以第  $j$  类飞机作用下的最大力学响应量定义的允许荷载重复作用次数.

然后把这些不同机型的累积损伤系数线性叠加, 具有最大损伤系数的条带就为道面结构设计的最不利位置, 把此条带的累积损伤系数就作为道面结构设计的累积损伤系数, 计算公式如下:

$$D = \max \left( \sum_j D_{ji} \right) \quad (14)$$

式中,  $D$  为用于道面结构设计的累积损伤系数.

## 8 结论

(1) 以应力(应变)扩散为基础, 提出了以应力(应变)扩散斜率和等效宽度为中心的荷载重复作用次数简化概念.

(2) 以 A380 的单轮参数为例建立了单轮、双层道面结构的等效宽度与广义模量以及厚度之间的关系, 并进一步给出了荷载重复作用次数的简化计算方法.

(3) 对多层结构建议按照谈至明等提出的方法进行换算. 以此为基础, 详细给出了多轮、多轴以及复杂起落架的等效宽度计算方法, 并形成了以等效宽度为核心的荷载重复作用次数简化计算方法.

(4) 在单机型分析的基础上, 进一步给出了混合交通条件下荷载重复作用次数的计算方法.

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] ZHAO Hongduo, LING Jianming. Discussion of coverage for airport asphalt pavement design [C]//Plan, Building and Management Transportation Infrastructure in China: Proceedings of the Seventh International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP). Reston: ASCE, 2007. 833-840.
- [3] 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: 同济大学交通运输工程学院, 2007.  
ZHAO Hongduo. New generation large aircraft oriented load analysis method and parameters for asphalt pavement design [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2007.
- [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] 谈至明, 姚祖康, 刘伯莹. 层状结构顶面当量回弹当量模量的近似计算[J]. 公路, 2003(8): 5.  
TAN Zhiming, YAO Zukang, LIU Boying. Approximate calculation of equivalent modulus of end face of layered structures [J]. Highway, 2003(8): 5.