

# 考虑接缝传荷作用的机场水泥道面板边应力折减分析

张献民, 李梦晓, 陈宇, 李长辉

(中国民航大学机场学院, 天津, 300300)

**摘要** 板边应力折减系数是设计水泥混凝土道面的重要参数之一,目前中国和美国在计算水泥道面结构厚度时均按照25%的折减系数考虑接缝的传荷作用,但与实际情况相差较大。基于现场测试数据,统计分析不同结构和接缝类型影响下板边应力折减的变化特征;同时结合我国机场水泥道面结构特点,采用有限元方法探究了道面结构参数和接缝刚度影响下道面板边应力折减的变化规律。结果表明:板边应力折减系数与道面结构参数和接缝类型密切相关;相较于基层厚度和基层模量,板边应力折减系数对板厚和地基反应模量变化更敏感,随板厚增大而增大,随地基反应模量增大而减小;板边应力折减系数随着接缝刚度增大呈现出“S”型增长,且随接缝传荷系数的增加呈现二次函数的增长趋势,由此给出了不同接缝传荷状况下板边应力折减系数的值。

**关键词** 水泥道面;板边应力;折减系数;有限元分析

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.06.010

**中图分类号** U416.216 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)06-0061-06

## An Analysis of Edge Stress Reduction for Airfield Concrete Pavement Slab Considering Joint Load Transfer

ZHANG Xianmin, LI Mengxiao, CHEN Yu, LI Changhui

(Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract** The edge stress reduction is one of the crucial factors in the airfield concrete pavement thickness design. At present, in calculating the thickness of cement pavement, the load transfer effect of joints is of consideration by both China and the United States according to 25 per cent of reduction factor in stress, but this is quite different from the actual situation. Based on the field measurement, the variation characteristics of stress reduction under the influence of structure parameters and joint types are analyzed statistically. Besides, in consideration of the airfield concrete pavement structure characteristics in China, the finite element method is adopted to analyze the rules of stress reduction under the influence of pavement structural parameters and joint stiffness. The result shows that the stress reduction factor is closely related to pavement structures and joint types. Furthermore, compared with the base thickness and modulus, the reduction factor of edge stress is more sensitive to the changes of the slab thickness and the foundation reaction modulus, and increases with increment of the slab thickness and decreases with increment of the

**收稿日期:** 2020-11-18

**基金项目:** 中国工程院咨询研究项目(院地合作重点项目 2019C1-0002);天津市教委科研计划项目(2019KJ122);中国民航机场工程研究基地开放基金项目(205016010411, 205016010413);中国民航大学科研启动基金项目(2020KYQD37)

**作者简介:** 张献民(1959—),男,河北邢台人,教授,博士生导师,研究方向为机场场道工程。E-mail:cauczxm@126.com

**通信作者:** 李梦晓(1994—),男,河北石家庄人,博士生,研究方向为机场场道工程。E-mail:lmx0826@163.com

**引用格式:** 张献民,李梦晓,陈宇,等.考虑接缝传荷作用的机场水泥道面板边应力折减分析[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(6):61-66. ZHANG Xianmin, LI Mengxiao, CHEN Yu, et al. An Analysis of Edge Stress Reduction for Airfield Concrete Pavement Slab Considering Joint Load Transfer[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(6): 61-66.

foundation reaction modulus. Moreover, with the increment of joint stiffness, the reduction factor presents an “S” growth trend and can be described by quadratic function. With the increment of the load transfer coefficient, the trend is approximately quadratic function. Finally, this paper gives the values of the stress reduction factor under different load transfer ability.

**Key words** airfield concrete pavement; edge stress; reduction factor; finite element analysis

水泥混凝土道面具有强度高、耐久性好和使用寿命长等优点,是我国民用机场主要采用的道面类型,设置接缝的素混凝土道面最为常见<sup>[1]</sup>。为加强相邻道面板承载协调性,要求接缝具有一定的传荷能力,因此接缝传荷成为水泥道面结构厚度计算的重要因素之一。目前中美在计算机场水泥道面结构厚度时一般先计算道面板板边应力,再按 25% 的应力折减来考虑接缝的传荷作用<sup>[2-3]</sup>。但理论和测试均表明,接缝的传荷作用与道面结构、接缝类型和温度等密切相关,采用恒定的应力折减必然对道面结构厚度计算产生影响<sup>[4]</sup>。因此,有必要对接缝传荷作用对道面板边的应力折减规律开展深入分析,以满足水泥混凝土道面精细化结构设计的需求。

板边应力折减研究起源于二战时期美国军用机场跑道建设项目,美国陆军工程兵团基于 Lockbourne 加速加载试验数据,提出以 25% 作为道面板边应力折减值,之后被广泛应用于机场水泥道面厚度计算<sup>[5]</sup>。但 Lockbourne 加速加载试验和之后进行的 Sharonville 重载试验路试均表明,25% 的取值对于设置传力杆的接缝偏于保守<sup>[6]</sup>。直到 2011 年,美国联邦航空局基于现场测试对接缝的传荷作用开展了深入而系统的分析,并根据气候区域和接缝类型提出了不同的板边应力折减值<sup>[4]</sup>。在国内,周正峰等在分析单轮荷载作用下道面结构参数对刚性道面结构响应的影响时,对板边应力折减进行了初步探讨,结果表明板边应力折减取值并不唯一<sup>[7]</sup>。

## 1 板边应力折减的表征方法

### 1.1 道面板接缝类型

水泥混凝土道面板接缝按功能可分为缩缝、胀缝、传力杆缝和拉杆接缝,按形状可分为假缝、平缝和企口缝等<sup>[8]</sup>。我国机场水泥混凝土道面中横缝一般为假缝,纵缝一般为企口缝或设置拉杆的企口缝<sup>[9]</sup>。

接缝具有一定程度的荷载传递能力。按构造类型的不同,接缝传荷类型主要可分为两种:第一种是集料嵌锁型,即依靠接缝断裂面上集料啮合作用传递剪力,属于这类接缝的有企口缝和不设传力杆的缩缝;第二是传力杆型,即依靠埋设在接缝两侧混凝土内的短段钢筋(传力杆)传递剪力以及少量弯矩和

扭矩,属于此类的接缝有设传力杆的胀缝、缩缝和施工缝以及设拉杆的接缝<sup>[10]</sup>。

### 1.2 板边应力折减表征指标

接缝的传荷性能是指受荷板和未受荷板通过传力杆传递剪力,一般使用直接指标(荷载比)或者间接指标(应力比、应变比和挠度比)进行评价<sup>[11-12]</sup>。目前,针对考虑接缝传荷作用的板边应力折减,国内外普遍采用应力折减系数(load transfer, LT)表征,板边应力折减系数的计算见式(1)<sup>[1,10]</sup>。

$$T_L = \frac{\sigma_U}{\sigma_F} = \frac{\sigma_F - \sigma_L}{\sigma_F} = \left(1 - \frac{\sigma_L}{\sigma_F}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $T_L$  为板边应力折减系数(%);  $\sigma_F$  为荷载作用板自由边缘的应力(MPa);  $\sigma_U$  为未受荷板板边最大应力(MPa);  $\sigma_L$  为受荷板的板边最大应力(MPa);  $\sigma_F$  为半无限大板自由边的板边应力。在现行规范中,我国采用的是基于威斯特卡德理论解的弯矩影响图来计算  $\sigma_F$ , 美国 6F 咨询通告采用有限元对有限尺寸自由边的大板来计算  $\sigma_F$ <sup>[9,13]</sup>。

## 2 测试数据统计与分析

### 2.1 测试方案

在现场测试中,一般通过在道面板接缝两侧埋入应变传感器如图 1 所示,实测受荷板和非受荷板应变,以此根据式(2)计算板边应力折减系数。同时,在板边翘曲较小的情况下该实测数据能准确反映应力折减系数变化规律<sup>[14]</sup>。



图 1 现场测试应变计埋设方案示意

$$T_L = \frac{\sigma_U}{\sigma_L + \sigma_U} = \frac{\epsilon_U}{\epsilon_L + \epsilon_U} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_U$  为非受荷板板边应变( $\mu\epsilon$ );  $\epsilon_L$  为受荷板板边应变( $\mu\epsilon$ )。

基于文献调研,本文汇总了 9 处现场实测的结果用于分析不同道面结构和接缝类型下板边应力折减系数的变化<sup>[4]</sup>。其中,道面板接缝涵盖了设传力杆的施工缝、设传力杆的缩缝、设拉杆的企口缝、集料

嵌锁型缩缝、企口缝、设传力杆的胀缝等类型。测试均通过多轮重型荷载施加荷载,具体道面结构参数和测试次数见表 1。

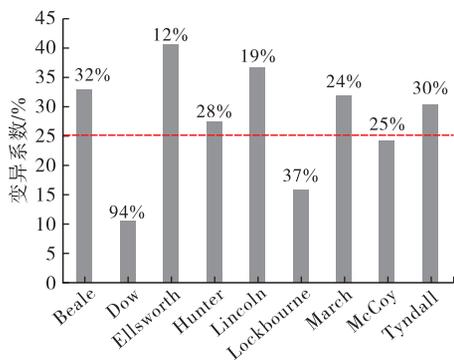
表 1 现场测试道面结构及测试次数

序号	测试场地	地基反应模量 (MN/m <sup>3</sup> )	板厚 /cm	测试 次数
1	Beale	58	58	15
2	Dow	95	48	16
3	Ellsworth	58	58	16
4	Hunter	47.5	46	15
5	Lincoln	18	53	16
6	Lockbourne	20	30	11
7	March	27	41	15
8	McCoy	61	46	14
9	Tyndall	43	20~25	10

## 2.2 测试结果统计分析

### 2.2.1 不同道面结构板边应力折减分析

统计分析每个测试场地的板边应力折减系数,其平均值和变异系数如图 2 所示。



注:图中数值为折减系数均值。

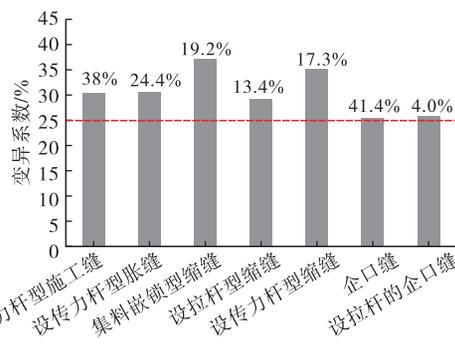
图 2 道面结构对应的板边应力折减系数均值和变异系数

由图 2 可知,Dow、Lockbourne 和 McCoy 3 个测试场地的应力折减系数均值为 10.5%、15.8%和 24.2%,均未达到 25%的取值;Beale、Ellsworth、Lincoln、March 和 Tyndall 5 个场地的折减系数均值均大于 25%。进一步分析发现,Lockbourne 测点的应力折减系数均未超过 25%。另外,综合所有实测数据可知,水泥道面板边应力折减系数范围为 0~48.3%,平均值主要集中在 15%~35%,变异系数均较大。以上表明应力折减系数与结构密切相关,且同一结构下板边应力折减系数差异性也较大,这可能是由温度、施工工艺等原因造成的<sup>[16]</sup>。

### 2.2.2 不同接缝类型下板边应力折减分析

各测试场地实测应力折减系数按照接缝类型进行统计分析,其均值和变异系数如图 3 所示。由图 3 可知,设传力杆型施工缝、设传力杆型胀缝、集料嵌锁型缩缝、设拉杆型缩缝和设传力杆型缩缝的应力折减系数均值分别为 30.6%、30.5%、37.2%、

29.2%、35.1%,均明显高于 25%,但变异性较大。企口缝和设拉杆的企口缝应力折减系数均值分别为 25.4%和 25.8%,达到了 25%,但设计富余不足。



注:图中数值为折减系数均值。

图 3 接缝类型对应的板边应力折减系数均值和变异系数

## 3 数值分析与讨论

### 3.1 板边应力折减系数的有限元分析方法

#### 3.1.1 有限元模型构建

根据我国机场水泥道面结构特点,本文将水泥道面假定为弹性地基上的双层板结构。采用 Winkler 地基<sup>[9]</sup>模拟地基对道面的作用,参数见表 2。

表 2 水泥道面板结构和材料参数

道面结构	参数	数值
水泥混凝土面层	弹性模量/GPa	36
	泊松比	0.15
	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	2 400
	厚度/cm	30~45
水泥稳定碎石基层	回弹模量/GPa	2~8
	泊松比	0.25
	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	2 200
天然砂砾垫层及土基	反应模量/(MN/m <sup>3</sup> )	40~160

为考虑基层超宽的影响,基层平面尺寸取值为 15 m×15 m;四边自由的单块板平面尺寸为 10 m×10 m<sup>[16]</sup>;设置接缝的道面板采用我国机场常用的 5 m×5 m 尺寸。采用接缝刚度量化的传力杆的传荷作用,道面板和基层间法向无粘结,切向采用库伦摩擦方程表征,摩擦系数取值为 1.5,同时基层边界设置横向约束<sup>[7,11]</sup>。另外,本文采用三维六面体实体单元模拟水泥道面板和基层,为提升计算效率并获得较高的计算精度,面层和基层均采用 C3D20R 单元,单元尺寸为 10 cm<sup>[16]</sup>;同时,采用弹簧单元模拟 Winkler 地基。荷载方面,本文采用国内常见的 B737-800 机型,将一个主起落架作用在道面板板边中部,轮印面积简化为矩形,尺寸为 0.427 m×0.294 m,轮距为 0.86 m,胎压为 1.47 MPa,构建模型如图 4 所示。

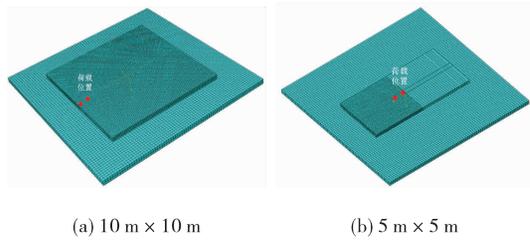


图4 水泥道面有限元模型网格划分和荷载布置

### 3.1.2 有限元模型验证

本文分别采用我国水泥道面设计规范的弯矩影

响图和 FEAFAA 对四边自由单块板模型和设接缝的双块板模型开展了验证。荷载为 B737-800、弯拉弹性模为 36 GPa、基层回弹模量为 4 GPa,不同结构和对应的应力计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知,有限元模型的计算结果和弯矩影响图理论解以及 FEAFAA 的计算结果的误差分别在 5% 和 4% 以内,表明本文的建模方法可行,应力计算结果可靠。

表3 有限元模型验证结构及其对比结果

板厚/cm	基层厚/cm	四边自由单块板板边应力			设接缝双块板板边应力		
		弯矩影响图/MPa	本文/MPa	误差/%	FEAFAA/MPa	本文/MPa	误差/%
32	30	2.61	2.74	4.9	2.26	2.32	2.8
36	25	2.08	2.17	4.3	1.56	1.62	4.0
40	40	2.23	2.31	3.5	1.41	1.44	2.2
44	35	1.47	1.54	4.5	0.85	0.87	2.6

### 3.2 结构参数对板边应力折减系数的影响

道面板厚度、基层厚度、基层模量和地基反应模量是道面结构力学响应分析的主要参数<sup>[7]</sup>。参照文献[9],选取常用的结构参数范围,对结构参数的敏感性开展正交分析,见表 4。分析中选用  $L_{16}(4^5)$  正交表,共计 16 种工况;接缝刚度设置为  $10 \text{ GN/m}^2$ ,对应接缝传荷系数为 95% 以上。最终,计算板边应力折减系数,分析结果见表 5。

表4 道面结构参数影响因素水平表

水平	1	2	3	4
道面板厚度/cm	32	36	40	44
基层厚度/cm	25	30	35	40
基层模量/GPa	2	4	6	8
地基反应模量/( $\text{MN/m}^3$ )	40	80	120	160

表5 板边应力折减系数极差和方差分析表

水平	道面板厚度	基层厚度	基层模量	地基反应模量	误差项
均值	14.3	32.9	32.3	35.1	31.1
1/%	25.4	31.5	30.5	31.0	30.9
2/%	35.9	29.6	30.9	29.0	30.4
3/%	47.3	29.0	29.3	27.9	30.5
极差	33.0	3.9	3.0	7.2	0.6
平方和	2 396.06	37.67	17.57	120.04	1.50
自由度	3	3	3	3	3
F 比	1 599.90	25.15	11.73	80.15	$F_{0.95}(3,3) = 9.28$

由表 5 极差分析结果可知,对板边应力折减系数影响程度依次为:道面板厚度 > 地基反应模量 >

基层厚度 > 基层模量。由表 5 的方差分析结果可知,道面板厚度、基层厚度、基层模量和地基反应模量对板边应力折减系数均具有显著性;其中,道面板厚度和地基反应模量的影响更为显著,对其进一步的影响规律开展详细分析如下。

#### 3.2.1 道面板厚度对板边应力折减的影响

板边应力折减系数随道面板厚度变化规律见图 5,图 5 上、下边缘为应力折减系数的最大和最小值,箱体部分涵盖折减系数在 25%~75% 之间,绿色方框中部横线和小方格表示应力折减系数的中位数和均值。由图 5 可知,随着道面板厚度的增大,道面板边应力折减系数呈现增大的趋势;当水泥道面板厚 32 cm 时,板边应力折减系数均值为 14.3%,小于 25%;当水泥道面板厚度超过 36 cm 时,板边应力折减系数均值为 25.4%、35.9% 和 45.3%,均大于 25%。目前我国新建机场水泥混凝土道面板厚度大多在 40 cm 以上,由此可见目前民用机场水泥道面结构设计中选取的折减系数偏于保守。

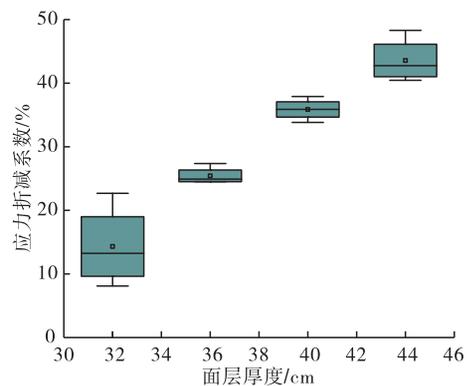


图5 板边应力折减系数随板厚变化规律

### 3.2.2 地基强度对板边应力折减的影响

板边应力折减系数随地基反应模量变化规律如图 6 所示,箱型图上、下边缘表示应力折减系数的最大和最小值,箱体部分涵盖折减系数在 25%~75% 之间范围的数据,绿色方框中部横线和小方格表示应力折减系数的中位数和均值。

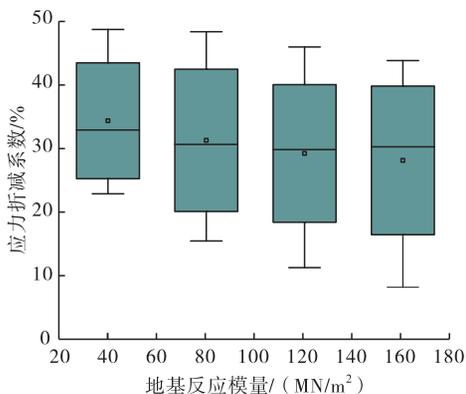


图 6 板边应力折减系数随地基强度变化规律

由图 6 可知,随着反应模量的增大,板边应力折减系数呈现减小的趋势,这是由于水泥道面板所受的支撑增强,机轮荷载作用下相邻水泥道面板挠度变化减小,非受荷板对受荷板板边应力分担减弱,导致应力折减系数出现小幅减小。四种地基反应模量下,板边应力折减系数均值分别为 35.1、31.0、29.0 和 27.9,均大于 25%,且随着地基反应模量增加,板边应力折减系数计算值低于 25% 的工况增多,说明该水平下其他结构参数(道面板厚度、基层模量、土基强度)对应力折减系数减小的影响增大。

### 3.3 接缝传荷能力对板边应力折减系数的影响

为进一步探究接缝传荷能力对板边应力折减的影响,在有限元分析时接缝刚度分别取 0.1、1、3.16、10、31.6、100、316、1 000、3 162、10 000、100 000 MN/m<sup>2</sup>。基层厚度取 40 cm,回弹模量 2 GPa。计算不同接缝刚度下板边应力折减系数,结果见图 7。

由图 7 可知,不同结构形式下,板边应力折减系数随着接缝刚度增大呈现出“S”型增长趋势;随着道面板厚度增加,曲线增长速率增大,同时板边应力折减系数最大值从 17% 增长到 47%,随板厚增加显著变大,由此可见板边应力折减系数与道面板厚度密切相关。

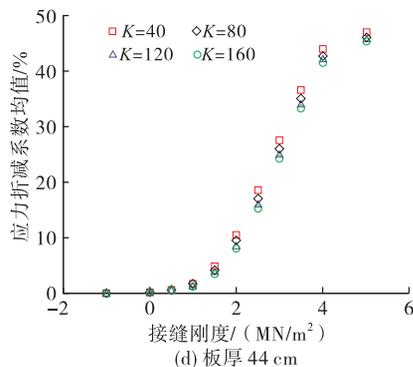
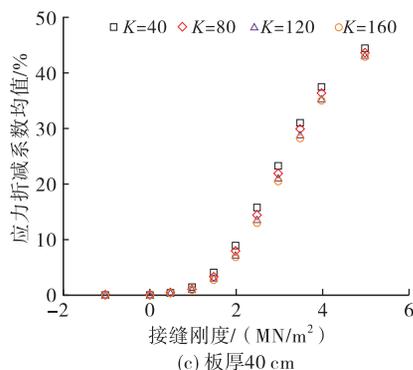
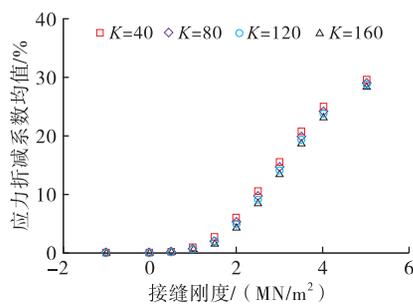
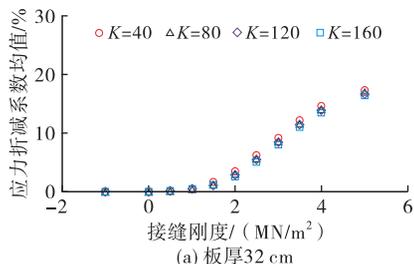


图 7 不同结构形式下板边应力折减系数随接缝刚度的变化

### 3.4 水泥混凝土道面板应力折减系数建议

实际工程中,一般采用挠度表征的接缝传荷系数(LTE<sub>0</sub>,简记 T<sub>E</sub>)量化接缝传荷能力。鉴于此,本文在上述分析基础上,计算不同道面结构在不同接缝刚度时产生的挠度,根据式(3)计算 LTE<sub>0</sub>,采用最小二乘法进行拟合,结果如图 8 所示。

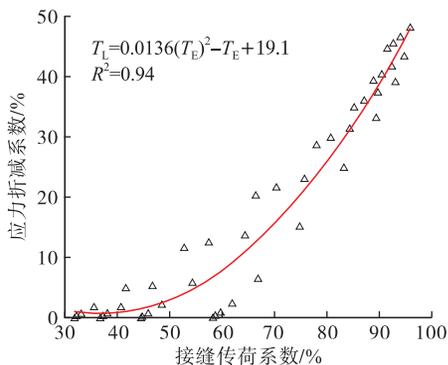


图 8 板边应力折减系数随接缝传荷系数的变化

由图 8 可知,应力折减系数随接缝传荷系数的增加而增加,趋势成二次函数关系;在接缝传荷系数

小于80%时数据离散性较大,随着接缝传荷能力增强离散性减小。根据我国机场道面评价管理技术规范中关于接缝传荷能力的等级划分,制定了板边应力折减系数范围,并给出推荐值见表6。同时根据上文分析,因道面板厚度对折减系数影响较大,建议水泥道面板厚较小时取低值,较大时取高值。

$$T_E = (W_U/W_L) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $W_U$ 为未受荷板板边挠度(mm); $W_L$ 为受荷板板边挠度(mm)。

表6 水泥混凝土道面板边应力折减系数取值

接缝传荷等级	好	中	次、差
$LTE_0/\%$	>80	56~80	<56
折减系数/%	30~49	12~30	0~12
折减系数推荐值/%	35	20	5

## 4 结论

1)实测结果表明,水泥混凝土道面板边应力折减系数与道面结构和接缝类型密切相关,均值主要集中在15%~35%,且变异系数较大;其中,设传力杆型施工缝、设传力杆型胀缝、集料嵌锁型缩缝、设拉杆型缩缝和设传力杆型缩缝的应力折减系数均值均明显高于25%。

2)道面板厚度、基层厚度、基层模量和地基反应模量均对板边应力折减产生影响,其中道面板厚度和地基反应模量的影响更为显著;板边应力折减系数随道面板厚度的增大呈现明显增大趋势,随地基反应模量的增大呈现减小趋势。

3)水泥道面板厚度超过36cm时,板边应力折减系数均大于25%,表明目前民用机场道面结构设计中选取的折减系数偏于保守。

4)不同结构形式下,板边应力折减系数随着接缝刚度增大呈现出“S”的增长趋势;应力折减系数随接缝传荷系数的增加呈现二次函数的增长趋势;在接缝传荷系数在80%以下时,应力折减系数较为离散,但随着接缝传荷能力增强,变异性减小。

5)根据接缝传荷能力的等级划分,制定了板边应力折减系数范围,并给出了推荐值,同时建议水泥道面板厚较小时取低值,较大时取高值。

### 参考文献:

[1] 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.  
 [2] JOSHI A P, MEHTA Y A, CLEARY D, et al. Load Transfer Efficiency of Rigid Airfield Pavement; Relationship to Design Thickness and Temperature Curling

[J]. Transportation Research Record, 2012, 2300: 68-74.  
 [3] 刘文,凌建明,赵鸿铎. 民用机场沥青混凝土道面设计方法综述[J]. 中国民航大学学报,2006,24(4):43-47.  
 [4] BYRUM C R, BARTON P J, D ROLLINGS R S, et al. Joint Load Transfer in Concrete Airfield Pavements; Final Report, IPRF-01-G-002-05-2[R]. Rosemont, USA: Innovative Pavement Research Foundation, 2011.  
 [5] ROLLINGS R S. Evolution of Airfield Design Philosophies[C]//The 22nd PIARC World Road Congress World Road Association. Durban, South Africa: PIARC, 2003: 346-356.  
 [6] ROLLINGS R S, PITTMAN D W. Field Instrumentation and Performance Monitoring of Rigid Pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 1992, 118(3): 361-370.  
 [7] 周正峰,凌建明,袁捷. 机场水泥混凝土道面接缝传荷能力分析[J]. 土木工程学报,2009(2):118-124.  
 [8] 翁兴中. 机场道面设计[M]. 北京:人民交通出版社,2017:170-177.  
 [9] 中国民用航空局. 民用机场水泥混凝土道面设计规范:MH/T5004-2010[S]. 北京:人民交通出版社,2010:20-25.  
 [10] 罗勇,袁捷. 三维有限元法对水泥混凝土道面接缝传荷作用的模拟方法研究[J]. 公路交通科技,2013,30(3):32-38.  
 [11] 张献民,刘小兰,张子文. 基于振动特性的机场刚性道面传荷性能[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(9): 1787-1796.  
 [12] 王宇翔,袁捷. 水泥混凝土路面传力杆接缝传荷数值模拟及实测分析[J]. 交通科技,2017(1):5-8.  
 [13] 屈允永,邹晓翎. 现行中美民用机场刚性道面设计方法对比分析[J]. 中外公路,2015,35(4): 73-77.  
 [14] ROLLINGS R S. Corps of Engineers Design Procedures for Rigid Airfield Pavements[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Pavement Design. West Lafayette, USA: Purdue University, 1981: 185-198.  
 [15] ROLLINGS R S. Developments in the Corps of Engineers Rigid Airfield Design Procedures[C]//Proceedings of 4th International Conference on Concrete Pavements. McLean, USA: Purdue University, 1989: 405-418.  
 [16] 廖公云,黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京:东南大学出版社,2008:101-108.

(编辑:姚树峰)