

文章编号:1671-8879(2019)05-0000-11

考虑机场道面结构损伤的传力杆设计修正方法

张润峰,戚春香,张献民,高玉换

(中国民航大学 机场学院,天津 300300)

摘要:为了减少机场道面结构损伤对接缝传荷性能的影响,基于相似理论,分别对传力杆松动和板底脱空 2 种损伤形式下,道面板受荷性能进行了模型试验研究。同时,采用 ABAQUS 有限元软件建立了接缝设传力杆的机场水泥混凝土道面结构三维有限元模型,对道面结构损伤模型试验进行了模拟。进一步,针对不同尺寸的传力杆松动、板中脱空和板角脱空,采用有限元方法分析了道面板在 7 种水平的传力杆长度、直径和间距下的传荷性能,以及 2 种结构损伤形式下传力杆参数对传荷性能的敏感性。在此基础上,以接缝剪力传递系数、关键传力杆分配系数、板底弯拉应力幅值以及界面应力为控制指标,分别分析了当道面板存在传力杆松动和板底脱空损伤时,相对于未损伤工况,提高传力杆参数尺寸对上述指标增长率的改善程度,进而提出了考虑道面结构损伤的传力杆参数设计范围,并与《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MN/T 5004—2010)(简称规范,下同)进行比较。结果表明:位移传荷系数 L_{TEB} 随脱空尺寸的增加先减小后增大,随着松动尺寸的增大逐渐降低,且 2 种结构损伤模型试验结果与有限元模拟规律一致;传力杆直径对松动损伤最敏感,而传力杆间距对板底脱空的敏感性最大;随着传力杆直径和间距的增加,控制指标增长率均呈现先减小后小幅增加并趋于稳定的趋势,说明当考虑道面结构损伤时,增加传力杆直径和减小其间距只能在一定范围内改善传荷性能。因此,对应不同板厚,考虑松动损伤的传力杆直径建议值为规范值的 110%~130%,而考虑板底脱空损伤时传力杆间距建议值为规范最大值的 70%~98%。

关键词:道路工程;机场工程;传力杆;三维有限元模型;敏感性分析;传荷性能

中图分类号:U411

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.05.001

Dowel bar design of multi-factor influence based on load transfer performance

ZHANG Run-feng, QI Chun-xiang, ZHANG Xian-min, GAO Yu-huan

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

Abstract: To reduce the impact of airport pavement structure damage on the load transfer performance of joints, model tests of load transfer performance with two kinds of damage, namely the looseness of the dowel bar and the slab void, were investigated based on the similarity theory. In addition, the three-dimensional finite element model of the airport cement concrete pavement structure with a joint dowel bar was established using ABAQUS finite element software, and the damage model test of pavement structure was simulated. Furthermore, the load transfer performance of the pavement slab was analyzed under seven levels of length,

收稿日期:2019-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(3122017037);中央高校基本科研业务费专项基金项目(511178456,3122015D014)

作者简介:张润峰(1979-),男,河北宁晋人,讲师,工学博士,E-mail:cauczrf@126.com。

diameter, and spacing of the dowel bar. The sensitivity of the dowel bar parameters to load transfer performance under two kinds of structural damage were also analyzed using the finite element method for different degrees of dowel bar looseness, slab void size, and slab corner void size. On this basis, considering the joint shear transfer coefficient, distribution coefficient of the key dowel bar, bending stress amplitude at the bottom of the slab, and interface stress as control indexes, the rule of the above index growth rate with the increase in size of the dowel bar parameter was analyzed when the looseness of the dowel bar and the slab void damage existed, compared with the non-damage condition. Furthermore, the design range of the parameters of the dowel bar considering the damage of the pavement structure was proposed and compared with the code of *Specifications for airport cement concrete pavement design* (MN/T 5004—2010). The results show that the displacement load transfer coefficient L_{TE8} decreases first and then increases with an increase of the void size, and it decreases gradually with the increase of the looseness. The experimental results of the two structural damage models are consistent with the finite element simulation law. The diameter of the dowel bars is the most sensitive to the loose damage, and the dowel bar spacing is the most sensitive to the slab void. With an increase in diameter and spacing of the dowel bar, the growth rate of the control index decreases first, then increases slightly and finally tends to be stable. It shows that when considering the damage of pavement structure, increasing the diameter of the dowel bar and reducing its spacing can only improve its load transfer performance within a certain range. According to different slab thicknesses, the recommended value of the dowel bar diameter, considering the loose damage, is 110% to 130% of the maximum value of the code, and considering the slab void damage, the recommended value of the dowel bar spacing is 70% to 98% of the maximum value of the code. 5 tabs, 16 figs, 21 refs.

Key words: road engineering; airport engineering; dowel bar; 3D finite element; sensitivity analysis; load transfer performance

0 引言

随着国民经济和航空交通事业的发展,中国布局规划民用机场总数呈持续增长趋势,民用机场建设即将进入高速发展时期。机场跑道因承担着飞机起降、滑行等重要任务,成为机场飞行区的重要基础设施。水泥混凝土道面在中国机场道面中占据重要地位,但普遍较早出现了沉陷、错台等损伤,其中由接缝引起的损害约占70%。接缝是机场水泥混凝土道面间的重要部位,是道面板间的荷载传递纽带,但也是整个道面结构的薄弱环节。传力杆的设置一定程度上改善了道面结构的整体性,提高了传荷性能,但随着飞机荷载作用次数的增加,传力杆会与混凝土黏结界面产生一定的松动,引起接缝传荷能力的衰减。同时,当板底出现不同程度的脱空时,也会引起接缝传荷能力减少。目前,刚性道面板端接缝传荷能力差引起的道面板使用功能和寿命降低问题,已成为制约中国机场水泥混凝土道面发展的主要技术难点。

中国现行《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MN/T 5004—2010)(简称规范,下同)中指出,接缝传力杆的设计仅与板厚有关,然而,板的接缝传荷体系受多种因素影响,如基层与面层的层间黏结性能、土基强度、飞机荷载与结构损伤等。中国对传力杆设计的研究工作还不够完善,如传力杆的适宜直径的设计问题,直径越大,传荷虽然得到了一定的提高,但也会影响接缝部位的施工质量进而导致道面平整度变差。因此,根据机场水泥混凝土接缝的实际受力特点,综合考虑多种因素,合理设计传力杆参数对于提高机场水泥混凝土道面工程质量和延长其寿命具有重要意义。目前,大量文献多是针对道面板接缝传荷性能分析及评价方法的研究。如Wang等先后应用有限元分析了Winkler、弹性半空间及层状地基上的路面位移和应力,提出用接缝两侧相邻面板边缘位移百分比作为评定接缝传荷能力的指标,研究了接缝传荷和部分脱空等情况的模拟及计算方法^[1-3]。基于Winkler地基模型,周正峰等采用ABAQUS有限元软件,按照“贡献面积”刚度分配

原则,研究了考虑层间接触时机场刚性道面结构有限元模型的建立,提出接缝刚度可按节点贡献面积分配的方法,进而根据建立的考虑接缝传荷能力的机场刚性道面三维有限元分析模型,分析了不同地基强度和起落架构型作用,以及道面结构的板边应力和位移,建立了承载板位移传荷系数与接缝刚度之间的关系模型,以及与不同形式荷载作用的应力折减系数之间的关系模型^[4-5]。申俊敏等基于 Winkler 地基上的双层结构模型,分析了传力杆几何尺寸、空间位置、与混凝土结合状况及布设方式对接缝传荷能力、传力杆内力和面层底部最大应力的影响,指出增加传力杆直径和长度不能有效提高传荷能力,弯沉传荷系数随传力杆竖直偏角的增大线性减小,随传力杆支撑模量的增大呈指数增大,随松动量的增大呈二次曲线下降^[6]。周德云等采用 Winkler 地基假设和剪切弹簧单元模型作为接缝传荷介质,应用有限单元方法分析了纵横缝的传荷能力以及混凝土板平面尺寸、车辆荷载形式和路面结构刚度对其影响,得到了位移比值与应力折减系数之间的关系^[7]。Crovetti 等基于 Winkler 地基模型,通过大量的有限元模拟建立了接缝传荷系数与接缝传荷刚度、道面结构和荷载参数之间的相关关系^[8-10]。Shiva 分析了传力杆与混凝土的接触设置对传荷及板应力的影响^[11]。彭久东等采用 Winkler 地基不等平面尺寸双层板模型,分析了层间接触条件、基层超宽、结构组合等对接缝弯沉传荷效率及应力折减系数的影响,比较了双层路面结构与单层路面结构在基层超宽情况下接缝弯沉传荷效率及应力折减系数的差异^[12]。

上述文献对接缝传荷体系的研究大多基于道面结构无损伤的情况。考虑到道面在重复轮载和大飞机特重轮载作用下,道面板会出现板底脱空,或传力杆与混凝土黏结界面处发生松动,这 2 种结构损伤都会对道面接缝体系的传荷性能造成影响。也有学者对此进行了研究,Huang 等采用有限元方法对道面板脱空进行了模拟^[13]。曾胜等基于 ANSYS 有限元计算软件,建立了通过设置剪切弹簧来模拟接缝的水泥混凝土板三维有限元分析模型,得到了缝边中部脱空和板角脱空 2 种状态下,受荷板和非受荷板弯沉随脱空尺寸及剪切弹簧系数的变化规律,并分析了板边弯沉值与板底脱空和接缝传荷耦合作用的影响关系^[14-16]。陈飞等建立了重复荷载作用下,考虑传力杆松动量的刚性路面传力杆接缝模型,提出了以第一传荷状态临界荷载为特征的传荷能力

评价指标和方法,研究了荷载大小、荷载作用位置及传力杆松动量对传力杆接缝传荷能力的影响^[17]。刘旭峰等通过室内试验分析了路面板接缝的单杆传荷衰变及偏位、松动的力学性能^[18-19]。上述文献虽然分析了道面结构损伤对传荷性能的影响,但对如何根据结构损伤与接缝传荷性能的关系提出合理的传力杆设计方法,以降低道面板结构损伤的概率,提高道面板的使用性能研究涉及较少。

为此,本文开展了考虑板底脱空和传力杆松动 2 种结构损伤形式的机场水泥混凝土道面板模型试验,并建立了接缝设传力杆的机场水泥混凝土道面结构三维有限元模型,模拟道面结构损伤模型试验。同时,对考虑传力杆松动和板底脱空 2 种破坏形式下,传力杆参数敏感性以及设计方法的改进进行了分析,以期对道面板接缝传力杆的设计、施工等提供参考。

1 道面结构损伤模型试验

1.1 道面板脱空模型试验

基于相似理论,整体模型的相似比采用 1:5,即模型试验道面板的尺寸为 1 m(长)×1 m(宽)×0.07 m(高),传力杆直径为 7 mm,间距为 0.062 m,试验布置如图 1 所示。在①③⑤⑦⑧号传力杆布设应变片。

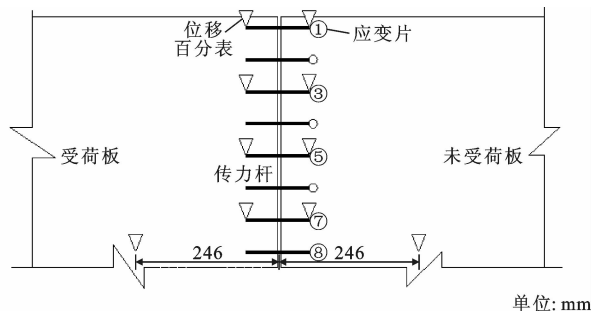


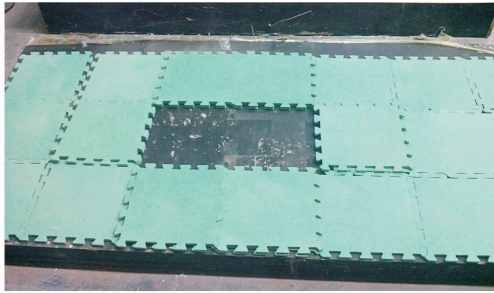
图1 传力杆及位移测量系统

Fig.1 Dowel bar and displacement measurement system

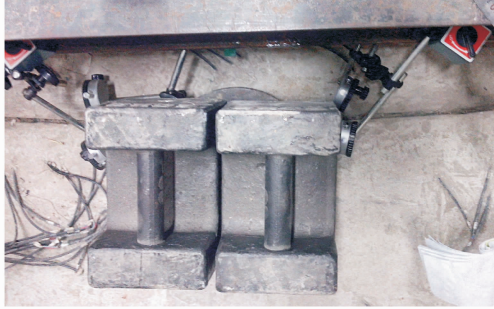
采用 PVC 垫来模拟脱空工况,如图 2 所示。试验中模拟考虑了 0.12 m×0.12 m、0.24 m×0.24 m、0.48 m×0.48 m、0.48 m×1.0 m 四种脱空面积的影响。采用吊车梁移动道面板,在橡胶垫上布置不同的脱空工况,并用加载块进行加载。同时在道面板上对称布置位移表,位移表布置点距接缝 3 cm。

1.2 传力杆松动模型试验

基于相似理论和圣维南原理,相似比定为 1:2,考虑邻近传力杆的协作,取 3 根传力杆,传力杆长度方向的应力集中敏感区域为 3 倍半径同心圆内的混



(a) 模拟脱空布置



(b) 脱空试验加载

图2 板底脱空模拟及加荷

Fig. 2 Slab void simulation and application of load

凝土区域。为提高试验精度可将切割边界适当放大,传力杆长度取0.5 m,模型尺寸为0.465 m(长) \times 0.25 m(宽) \times 0.175 m(高)。松动试验模型是通过在传力杆上缠绕胶带的方法模拟松动长度,忽略高度的影响。考虑到松动高度也会对传力杆传荷性能有影响,模型试验均在传力杆上缠绕2圈胶带,经测量,其厚度为0.1 mm。室内试验模型及界面应变片粘贴如图3、图4所示。



图3 松动试验模型

Fig. 3 Loose test model

试验分别制作了传力杆无松动以及松动尺寸为0.05、0.10、0.15 m四种工况的模型,松动模型试验通过加载测定道面板松动长度与道面板模型的位移、传力杆应力以及杆与混凝土界面附近的应力分布规律。界面应变片粘贴位置如图5所示。应变片

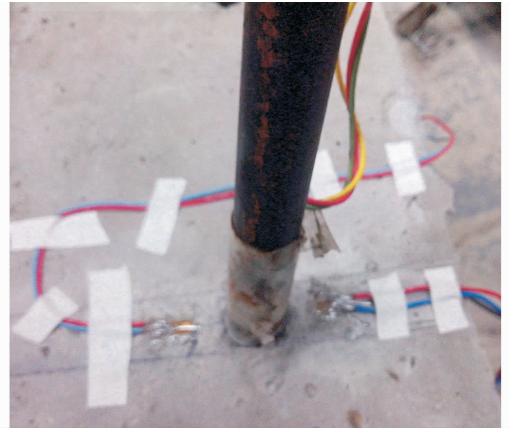
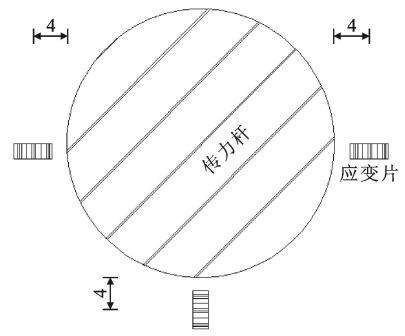


图4 界面应变片粘贴

Fig. 4 Paste of strain gauge in interface



单位: mm

图5 混凝土应变片位置

Fig. 5 Strain gauge on concrete

十字中心位置距离传力杆边界均为4 mm,加载如图6所示。



图6 模型加载

Fig. 6 Model load application

2 道面结构损伤的有限元模拟

2.1 有限元模型参数

采用ABAQUS有限元软件,建立机场跑道道面结构的三维有限元模型,其中,传力杆与整个道面结构均采用实体单元模拟。取相邻2块道面板,尺寸均为5 m \times 5 m,板间接缝宽度为10 mm,基层厚

度 30 cm,土基深度为 8 m,传力杆的弹性模量 2×10^5 MPa。面层、基层、土基以及传力杆的泊松比分别取 0.15、0.3、0.25、0.2。

由于传力杆一端与混凝土板固定,另一端与板自由滑动,因此,在有限元模型中,采用接触单元模拟传力杆与道面板的接触状态,采用 Tie 命令模拟传力杆的固定端,通过摩擦模拟自由滑动端,摩擦因数取 0.005^[11,20],法向采用硬接触。此外,面层与基层之间也采用摩擦接触,摩擦因数取 1.5,基层和土基之间采用完全连续接触状态。

综合考虑运行时间和收敛性,对设置传力杆道面结构的三维有限元模型进行网格划分,网格全部为六面体,单元类型为 C3D8R,道面板及基层厚度方向分别为 4 份和 3 份,水平方向接缝处最密,自接缝向两侧采用由密到疏的网格划分,整体单元的长、宽均为 0.25 m。土基深度方向采用不均匀分配,由近及远依次由密到疏的网格划分,依据研究目标,传力杆与混凝土界面是关键部位,在传力杆及其周围混凝土以及横向接缝处采用比较细的网格,从接缝到远处边界采用递增的网格梯度。道面板与传力杆的网格划分情况见图 7。此外,考虑到道面板的实际空间约束情况,限制板长边方向的水平移动,板宽方向设为固定端。

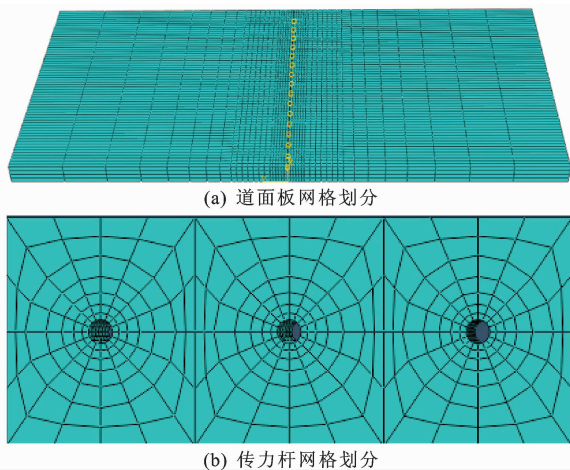


图 7 有限元模型网格划分

Fig. 7 Finite element model meshing

2.2 道面板传荷性能评价指标

2.2.1 位移传荷系数 L_{TEs}

位移传荷系数是评价机场刚性道面板接缝传荷能力的重要指标,通常采用未受荷板的板边位移 D_w 与受荷板的板边位移 D_1 的百分比来表征,即

$$L_{TEs} = \frac{D_w}{D_1} \times 100\% \quad (1)$$

2.2.2 剪力传递系数 T_{LE}

为了更好地描述传力杆系统的荷载传递能力,在有限元分析时常采用剪力传递系数 T_{LE} 来表征,即全部传力杆所传递的剪力总和与外荷载的百分比,可表示为

$$T_{LE} = \frac{\sum_{i=1}^N F_i}{P} \times 100\% \quad (2)$$

式中: F_i 为第 i 根传力杆剪力(kN); N 为传力杆总数; P 为飞机轴载(kN)。

2.3 道面板脱空损伤有限元模拟

基于上述有限元模型,忽略脱空高度,仅考虑板底脱空面积的影响,对道面板脱空模型试验进行模拟。表 1 给出了不同脱空尺寸道面板位移及传荷效率的有限元模拟结果。同时与脱空试验采集的位移传荷效率进行比较。

表 1 不同脱空尺寸下的位移及传荷效率

Tab. 1 Displacement and load transfer efficiencies under different sizes of slab void

参数	脱空尺寸/m		受荷板位	未受荷板	$L_{TEs}/\%$	相对
	长	宽	移/mm	位移/mm		
有限元结果	0	0	0.332	0.316	95.176	
	0.60	0.60	0.340	0.323	95.088	
	1.20	1.20	0.362	0.345	95.168	
	2.40	2.40	0.440	0.421	95.814	
	2.40	5.00	1.494	1.492	99.866	
试验结果	0	0	1.337	1.310	97.981	2.94
	0.12	0.12				
	0.24	0.24	1.460	1.422	97.397	2.34
	0.48	0.48	1.523	1.496	98.227	2.52
	0.48	1.00	1.623	1.621	99.692	-0.17

从表 1 可以看出,位移传荷效率随脱空尺寸的增大呈先减小后增大的趋势(除个别破损试验数据),虽然模型试验测得的传荷效率大于有限元模拟结果,但其相对误差在 5% 之内,这可能是模型试验边界条件与有限元模型的偏差造成的。

2.4 传力杆松动损伤有限元模拟

依据传力杆松动损伤模型试验,建立同一混凝土等级、传力杆直径和长度等结构参数条件下的有限元模型,并对模型试验加载工况进行模拟。图 8 为有限元与模型试验对应的传荷效率随松动长度的变化对比。

由图 8 可知,接缝传荷效率随着松动量的增大而降低。当松动量小于 0.05 m 时,传荷效率降低较快,而当松动量大于 0.1 m 时,传荷效率的下降

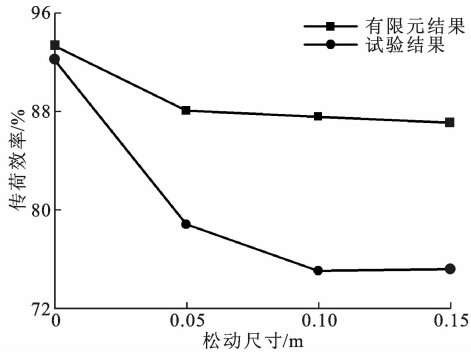


图8 传荷效率随松动尺寸变化

Fig. 8 Displacement load transfer efficiency varies with size of loose

速度趋于平缓。模型试验传荷效率降低的速度大于有限元结果,但其规律是相符的。

进一步,对松动长度与杆剪力、界面应力的有限元和试验结果进行对比分析,如表2所示。

表2 界面应变和传力杆应变试验与有限元结果对比

Tab. 2 Strain comparisons of interface and dowel bar between test and finite element results

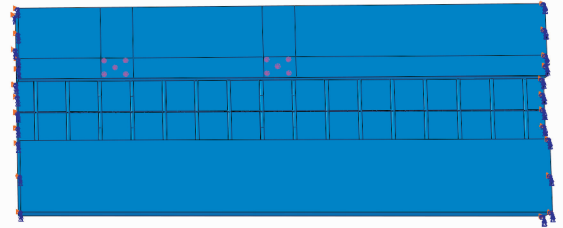
松动尺寸/m	松动杆界面应变/ 10^{-6}		板底弯拉应变/ 10^{-6}		杆剪切应变/ 10^{-6}		
	竖向	横向	受荷板	未受荷板	松动杆	未松动杆	
有限元结果	0	-32.70	0.34	4.85	2.53	0.12	7.85
	0.05	-3.38	-0.10	5.69	2.06	14.50	6.23
	0.10	-3.20	-0.17	5.52	2.87	4.28	0.16
	0.15	-2.77	1.18	5.86	2.18	0.64	1.34
试验结果	0	-31.60	-0.30	0.20		11.20	
	0.05	-3.40		7.85	3.10		6.90
	0.10				4.90		0.12
	0.15	-2.25	0.90	3.00	1.10	0.70	1.30

从表2可以看出:随着松动尺寸的增大,松动杆下界面混凝土的竖向压应变先迅速下降(松动量 $0\sim 0.05$ m),后下降幅度平缓,与其对传荷效率的影响规律相同;随着传力杆松动尺寸的增大,松动传力杆的剪切应变先增大后迅速减小,非松动的传力杆规律与之相反。二者均是松动量大于 0.1 m后,变化幅度趋于平缓,说明本文试验结果与有限元模拟结果一致。因此,松动的三维有限元模型在一定条件下是有效的、可靠的。

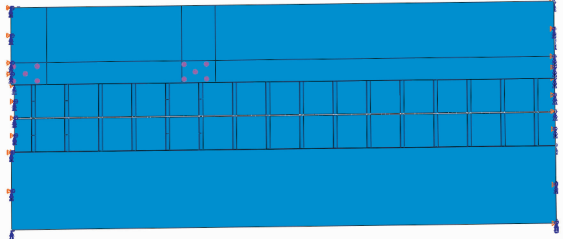
3 传力杆参数对道面结构损伤的敏感性分析

基于上文的三维有限元模型,分别建立在板中和板角存在一定传力杆松动和板底脱空损伤的道面结构计算模型,如图9、图10所示。脱空类型为接

缝两侧对称脱空,假设脱空区域基础与面层完全脱空,脱空的厚度为基层的厚度。板中脱空形状取正方形,板角脱空取等边三角形^[14,21]。2种道面结构损伤形式均忽略松动高度和脱空高度的影响,仅考虑传力杆松动尺寸和板底脱空面积的影响。



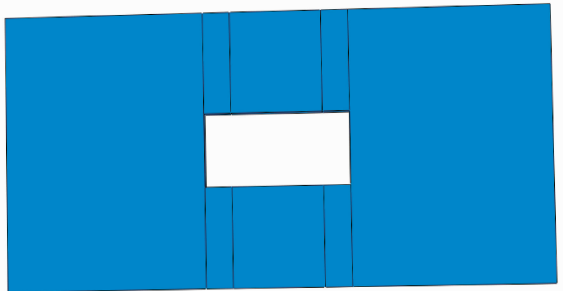
(a) 板中松动模型



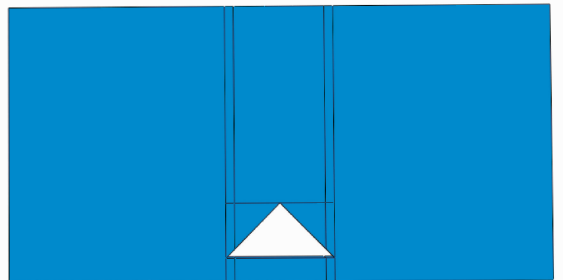
(b) 板角松动模型

图9 松动有限元模型

Fig. 9 Loose finite element models



(a) 板中脱空模型



(b) 板角脱空模型

图10 脱空有限元模型

Fig. 10 Slab void finite element models

3.1 传力杆参数对松动损伤的敏感性分析

3.1.1 松动长度

基于有限元模型,对板中和板角2种荷位下6种松动长度工况下的传荷性能进行分析,松动长度分别取 $0, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15$ m。图11给出了6种松动工况下的接缝传荷性能指标

变化规律。

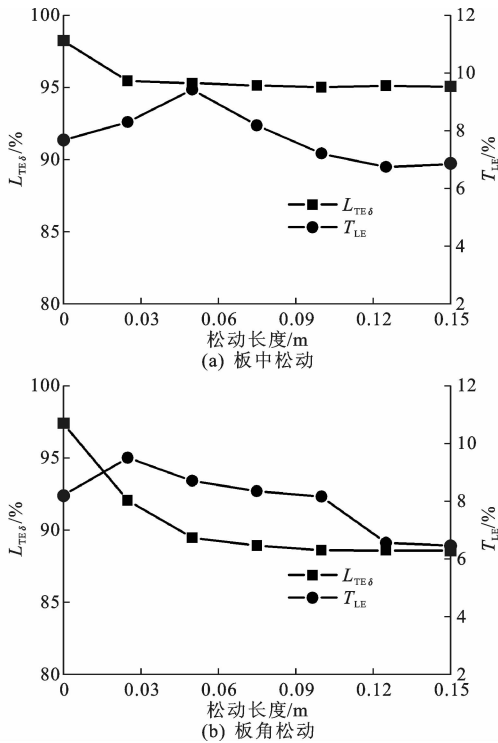


图 11 传荷性能指标随松动尺寸的变化规律

Fig. 11 Variation laws of load transfer performance indexes with loose size

由图 11 可以看出,随着传力杆松动量的增长,接缝位移传荷系数逐渐降低,而剪力传递系数先增后减。这是由于当传力杆与混凝土界面松动达到一定长度后,关键传力杆由松动传力杆转移到其邻近杆件,导致剪力传递系数发生变化。对比板角松动和板中松动 2 种情况,板角松动对接缝传荷性能指标影响程度更显著。进一步,对板角传力杆松动情况分析发现,当松动长度由 0 增大到 0.15 m 时,位移传荷系数降低了 9.085%,而传力杆剪力传递系数降低了 18.79%,可见传力杆松动对道面接缝传荷指标 T_{LE} 影响更显著。

3.1.2 传力杆尺寸

为减小杆件松动损伤对传荷性能的影响,有必要分析基于松动损伤传力杆参数的敏感性。传力杆的设计参数主要包括直径、间距和长度。基于传力杆松动的有限元模型,参照规范,给出了 7 种不同水平的传力杆直径、间距和长度组合,见表 3。

将剪力传递系数作为研究传力杆尺寸(包括直径、间距和长度)对松动损伤敏感性的控制指标,假定 δ 为参数敏感系数,即

在不同的杆参数下,界面松动对剪力传递系数的影响如图 12 所示。

表 3 影响因素水平

Tab. 3 Influence factor levels

因素水平	杆直径 d /mm	杆间距 s /mm	杆长度 l /mm
1	28	210	400
2	30	250	450
3	32	310	500
4	35	350	550
5	38	390	600
6	40	420	650
7	42	460	700

$$\delta = \left| \frac{D_c}{D_z} \right| \quad (3)$$

式中: D_c 为传力杆参数变化率; D_z 为控制指标变化率。

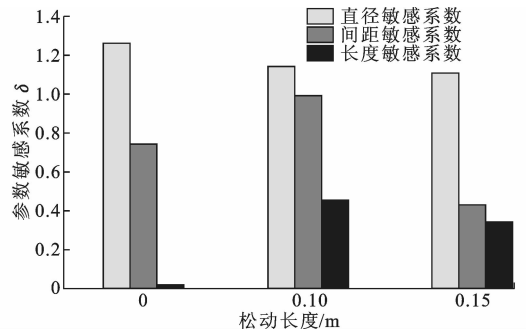


图 12 T_{LE} 参数敏感系数与松动量的关系

Fig. 12 Relationships between sensitivity coefficients of T_{LE} indexes and loose size

由图 12 可以看出,以传力杆剪力传递系数为控制指标,在不同松动尺寸时,相比传力杆间距和长度,直径的参数敏感系数最大,说明传力杆直径对松动量损伤的敏感性最为显著。

3.1.3 基于松动损伤的传力杆参数设计

设计合理的传力杆直径,对于传力杆松动导致的传荷失效有一定减缓作用。假定传力杆松动量为 0.1 m,结合规范中的传力杆参数,分析不同道面板厚和不同传力杆直径的接缝传荷性能。考虑到传力杆直径不仅影响剪力传递系数和关键传力杆分配系数 f_{dc} (传力杆最大剪力与传力杆总剪力比),还会对传力杆与混凝土的界面拉应力和剪切应力有一定的影响。因此,将上述 4 个指标作为分析对象,并对比松动与无损伤 2 种工况下的指标值,并分析各指标的增长率。图 13 给出了不同板厚下 4 个指标增长率随传力杆直径的变化规律。

由图 13 可以看出,在不同板厚下,传力杆松动引起的 T_{LE} 、 f_{dc} 以及界面应力指标增长率随直径的增加,均呈先减小后小幅增加并趋于稳定的趋势。说明在考虑传力杆松动损伤时,不同的道面板厚度

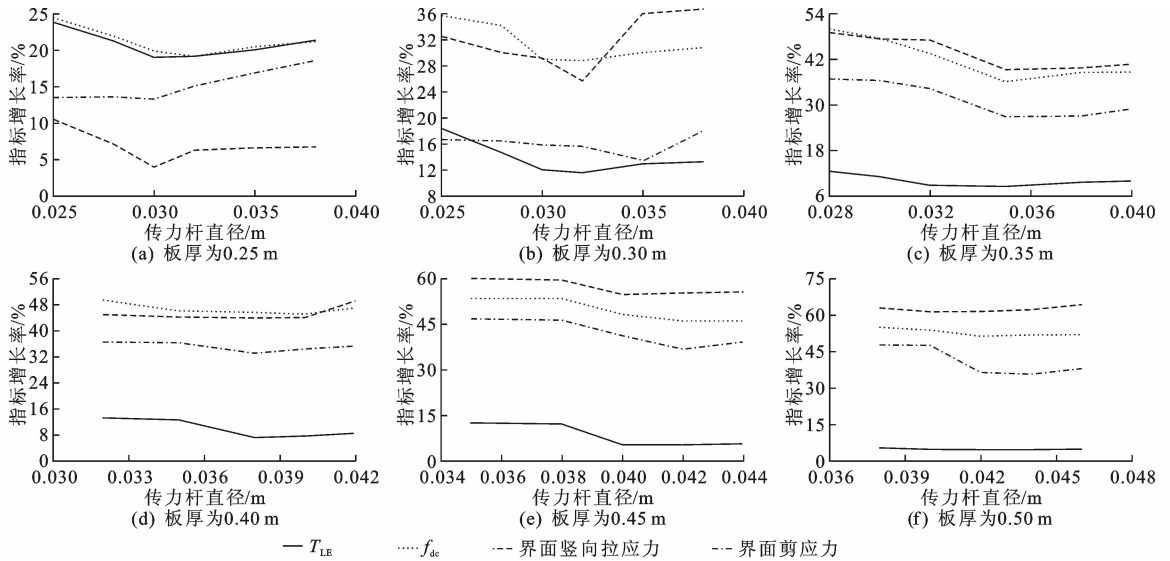


图13 指标增长率随传力杆直径的变化

Fig. 13 Index growth rates varies with diameter of dowel bar

均有一个最佳的传力杆直径范围。从图13(a)可以看出,4条曲线均在传力杆直径为0.030~0.032m范围内增长最显著,当大于该范围时,曲线近似趋于稳定。因此,针对0.25m厚度的道面板,考虑传力杆松动损伤时,最佳的传力杆直径设计范围为0.030~0.032m。采用同样的方法,综合剪力传递系数、关键传力杆分配系数和传力杆与混凝土的界面拉应力与剪应力4个分析指标。表4给出了考虑松动损伤工况下,不同道面板厚度传力杆直径的建议范围值,并与规范值进行对比。可以发现,考虑松动损伤的传力杆直径建议值均大于规范值,为规范值的110%~130%(即放大系数)。说明当道面板出现传力杆松动时,按照规范设计传力杆直径对道面板传荷和受力是不利的。

表4 传力杆直径建议值与规范值对比

Tab. 4 Comparisons of recommended and code values of dowel bar diameter

道面板厚/m	本文建议值/m	规范值/m	放大系数
0.21~0.25	0.030~0.032	0.025	1.20~1.28
0.26~0.30	0.032~0.035	0.030	1.07~1.17
0.31~0.35	0.035~0.038	0.032	1.09~1.19
0.36~0.40	0.038~0.040	0.035	1.09~1.14
0.41~0.45	0.040~0.042	0.038	1.05~1.11
0.46~0.50	0.042~0.044	0.040	1.05~1.10

3.2 板底脱空对道面接缝传荷体系的影响

3.2.1 板底脱空对接缝传荷影响

在板边中部和板角2种荷位下,取6种脱空边长分别为0、0.4、0.8、1.2、1.6、2.0、2.4m,分析计算各板底脱空工况下,道面板的接缝传荷性能及应

力状况。图14给出了道面板的传荷性能脱空尺寸的变化规律。

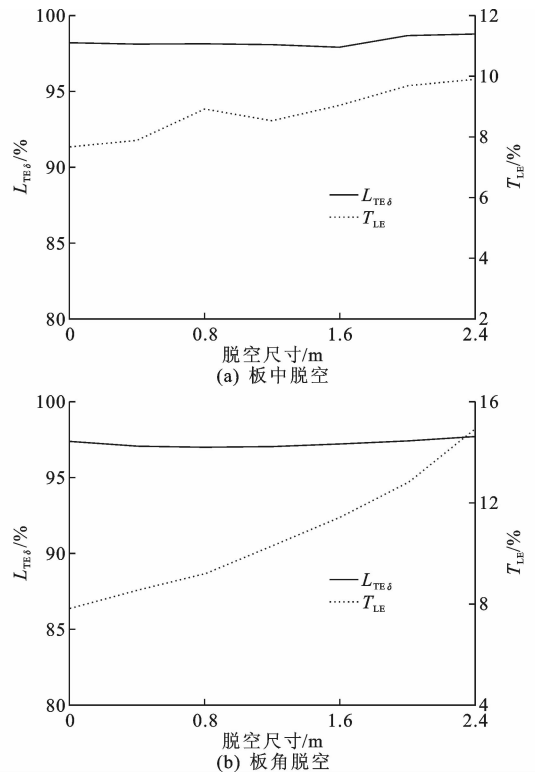


图14 传荷性能随脱空尺寸的变化规律

Fig. 14 Variation laws of load transfer performance indexes with void size

由图14可以看出,脱空尺寸对位移传荷系数的影响不明显,而对剪力传递系数影响显著。随着脱空尺寸的增加,剪力传递系数和板底弯拉应力明显增大,关键传力杆的传荷分配系数先小幅增加后大

幅减小。板角脱空对各指标的影响程度明显大于板中脱空情况。对于板角脱空工况,当脱空尺寸由 0 增大到 2.4 m 时,位移传荷系数降低了 4.09%,剪力传递系数降低了 72.53%,可见,传力杆剪力传递系数对板底脱空损伤非常敏感。

3.2.2 传力杆参数对板底脱空的损伤敏感性分析

将传力杆板底弯拉应力 σ 的幅值作为研究传力杆参数对板底脱空损伤敏感性的控制指标,依据式(3)计算传力杆直径、间距和长度在不同脱空尺寸下的参数敏感系数,如图 15 所示。

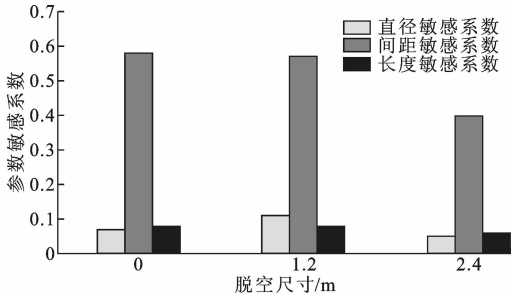


图 15 弯拉应力参数敏感系数与脱空尺寸变化

Fig. 15 Variations between sensitivity coefficients of flexural-tensile stress and void size

由图 15 可以看出,在不同脱空尺寸下,以板底弯拉应力为控制指标,相比传力杆直径和长度参数,传力杆间距的敏感性最大。

3.2.3 基于脱空损伤的传力杆参数设计

将剪力传递系数、板底弯拉应力、传力杆与混凝土的界面拉应力和剪切应力作为分析指标,假定板底脱空量为 0.8 m,结合规范中的传力杆参数,分析在不同道面板厚时,脱空损伤引起的各指标增长率随传力杆间距的变化规律,如图 16 所示。

由图 16 可以看出,在不同板厚下,剪力传递系数、弯拉应力、界面应力指标增长率随传力杆间距的增加,各曲线均有突变转折的过渡段。说明不同板厚的传力杆间距过大和过小都会引起应力指标的增加,这是不利的。因此,综合以上 4 个指标,选取不同板厚对应的传力杆间距的合理设计范围值如表 5 所示,并与规范推荐结果进行对比。由表 5 可知,考虑板底脱空损伤的传力杆间距建议值均小于规范最大值,为规范最大值的 70%~98%。说明当道面板出现脱空时,按照规范最大间距设计传力杆对道面板传荷和受力不利。

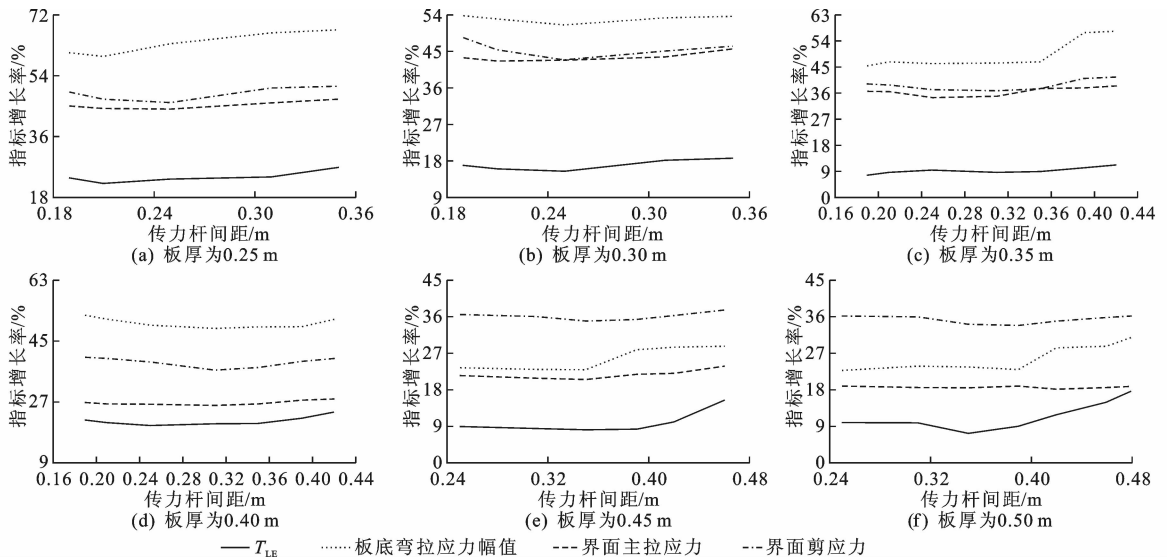


图 16 控制指标增长率随传力杆间距的变化规律

Fig. 16 Variation laws of control index with growth rate of dowel bars spacing

表 5 传力杆间距范围建议值与规范值对比

Tab. 5 Comparisons of recommended values and code values of spacing between dowel bars

道面板厚 h/m	本文建议值/ m	规范最大值/ m	缩小系数
0.21~0.25	0.21~0.25	0.30	0.70~0.83
0.26~0.30	0.21~0.25	0.30	0.70~0.83
0.31~0.35	0.25~0.31	0.35	0.71~0.89
0.36~0.40	0.25~0.31	0.35	0.71~0.89
0.41~0.45	0.31~0.35	0.40	0.78~0.88
0.46~0.50	0.35~0.39	0.40	0.88~0.98

4 结 语

(1)对于传力杆松动和板底脱空 2 种损伤形式的模型试验结果与有限元模拟规律一致,道面板位移传荷系数随脱空尺寸的增加先减小后增大,随着松动尺寸的增大逐渐降低。

(2)松动长度对传力杆剪力传递系数影响显著。当松动长度由 0 增大到 0.15 m 时,传力杆剪力传递

系数降低了 18.79%。在不同松动量时,相比传力杆间距和长度参数,传力杆直径对松动量损伤的敏感性最显著。考虑松动损伤,得出不同道面板厚的传力杆直径设计值为规范值的 110%~130% 倍。说明当道面板出现传力杆松动时,按照规范设计传力杆直径对道面板传荷和受力是不利的。

(3)传力杆剪力传递系数和板底弯拉应力幅值对板底脱空损伤非常敏感,对于板角,当脱空尺寸由 0 增大到 2.4 m 时,剪力传递系数降低了 72.53%。在不同脱空尺寸时,相比传力杆直径和长度参数,传力杆间距的敏感性最大。考虑板底脱空,给出了不同板厚对应的传力杆间距合理设计范围值,为规范最大值的 70%~98%。说明当道面板出现脱空时,按照规范最大间距设计传力杆对道面板传荷和受力不利。

(4)本文中传力杆松动及道面板脱空模型试验的数据量较少,且有限元数值模拟结果得到的考虑机场道面结构损伤的传力杆设计修正方法还需进一步验证和完善。本文仅对传力杆松动和板底脱空 2 种损伤形式的接缝传荷性能进行了分析,而对于损伤的交叉设计以及其他损伤形式下的接缝传荷性能还需进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] WANG S K, SARGIOUS M, CHEUNG Y K. Advanced analysis of rigid pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 1972, 98: 37-44.
- [2] HUANG Y H, WANG S T. Finite element analysis of concrete slabs and its implication for rigid pavement design[J]. Highway Research Record, 1973 (466): 55-69.
- [3] HUANG Y H. Finite element analysis of slabs on elastic solids[J]. Transportation Engineering Journal of ASCE, 1974, 100(2): 403-416.
- [4] 周正峰. Winkler 地基上机场刚性道面接缝传荷能力评价模型[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2011, 30(2): 237-241.
ZHOU Zheng-feng. Evaluation of load transfer efficiency at joints for rigid airport pavement on Winkler foundation[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, Natural Science, 2011, 30(2): 237-241.
- [5] 周正峰, 凌建明. 基于 ABAQUS 的机场刚性道面结构有限元模型[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3): 39-44.
ZHOU Zheng-feng, LING Jian-ming. Finite element

model of airport rigid pavement structure based on ABAQUS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 39-44.

- [6] 申俊敏, 张艳聪, 李祖仲. 重载交通水泥路面传力杆设计的力学分析和建议[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(1): 58-63.
SHEN Jun-min, ZHANG Yan-cong, LI Zu-zhong. Mechanical analysis and suggestions of dowel bar design in cement pavement under heavy traffic[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(1): 58-63.
- [7] 周德云, 姚祖康. 水泥混凝土路面接缝传荷能力的分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 1993, 21(1): 57-65.
ZHOU De-yun, YAO Zu-kang. Analysis of load transfer at joints in concrete pavements[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1993, 21(1): 57-65.
- [8] CROVETTI J A. Design and evaluation of jointed concrete pavement systems incorporating free-draining base layers[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994.
- [9] ZOLLINGER D G, BUCH N, XIN D, et al. Performance of continuously reinforced concrete pavements: Volume VI—CRC pavement design, construction, and performance[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1999.
- [10] IOANNIDES A M, KOROVESIS G T. Analysis and design of doweled slab-on-grade pavement systems[J]. Journal of Transportation Engineering, 1992, 118(6): 745-768.
- [11] SHIVA S. Characterization of stresses induced in doweled joints due to thermal and impact loads[D]. Morgantown: West Virginia University, 2001.
- [12] 彭久东, 周玉民, 刘伯莹, 等. 水泥混凝土路面结构接缝传荷能力分析[J]. 公路, 2010(5): 76-82.
PENG Jiu-dong, ZHOU Yu-min, LIU Bo-ying, et al. Analysis of joint load transfer capability for cement concrete pavement structure[J]. Highway, 2010(5): 76-82.
- [13] HUANG Y H, WANG S T. Finite element analysis of rigid pavements with partial subgrade contact[J]. Transportation Research Record, 1974(485): 39-54.
- [14] 曾胜, 张显安. 水泥混凝土板下脱空状况时接缝处弯沉的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报. 2005, 2(6): 31-36.
ZENG Sheng, ZHANG Xian-an. Analysis of deflection at joint on the condition of PCC void subgrade

- [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(6): 31-36.
- [15] 曾 胜, 陈明宪. 水泥混凝土路面脱空与传荷作用机理研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(1): 68-72.
ZENG Sheng, CHEN Ming-xian. Research on the concrete pavement void and load transfer mechanism [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(1): 68-72.
- [16] 王 陶, 王复明, 王 钊. 弹性地基接缝板模量反演和地基脱空判定 [J]. 岩土力学, 2003, 24 (2): 233-236.
WANG Tao, WANG Fu-ming, WANG Zhao. Modulus back analysis and void identification of jointed slab on elastic foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 233-236.
- [17] 陈 飞, 张 宁, 林亚萍, 等. 刚性路面传力杆接缝传荷能力评价新方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6 (4): 47-51.
CHEN Fei, ZHANG Ning, LIN Ya-ping, et al. New load-transferred evaluating method at doweled joint of rigid pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(4): 47-51.
- [18] 刘旭峰. 水泥混凝土路面接缝传荷衰变试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
LIU Xu-feng. Study on the decay of load transfer on cement concrete pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [19] 李洛克. 水泥混凝土路面传力杆的传荷失效机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
LI Luo-ke. Research on the load transfer failure mechanism for dowel bar in concrete pavement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [20] 蒋应军, 张伟宏. 传力杆对接缝传荷能力及临界荷位处应力的影响 [J]. 工程力学, 2009, 26(3): 21-25.
JIANG Ying-jun, ZHANG Wei-hong. Influence of dowel bars on load transfer efficiency and thermal stresses in cement concrete pavement [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3): 21-25.
- [21] 谭 悦, 凌建明, 袁 捷, 等. 脱空对机场水泥混凝土道面荷载应力的影响 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 552-556, 568.
TAN Yue, LING Jian-ming, YUAN Jie, et al. Influence of voids to loading stresses of airport cement concrete pavement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(4): 552-556, 568.