

装配式铝道面板结构力学响应分析

王润唐¹, 蔡良才¹, 许 巍¹, 周少辉²

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 93428 部队, 河北保定, 071051)

摘要 采用 ANSYS 有限元软件建立了多层弹性地基上装配式铝道面板道面结构的三维有限元模型, 为装配式铝道面板道面结构的设计提供计算方法。同时, 利用有限元模型计算所使用飞机在典型道面结构上的力学响应。分析发现道面板类型对力学响应影响不大, 而道面板与基层间的接触状态影响较大, 接触系数从 0.01 增至 10 时单双板的弯沉分别减少 17.2% 和 9.9%, 基层层底弯拉应力减少 21.7% 和 27.1%, 说明改善道面板与基层间状态至关重要。最后完成了现场承载板试验和通行试验, 得到的试验结果验证了有限元模型的正确性, 为同类型道面结构提供了分析计算方法。

关键词 装配式铝道面板; 力学响应; 接触系数

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.03.018

中图分类号 V351.11; U416.212 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)03-0101-06

An Analysis of Mechanical Response of the Aluminum Sandwich Panel

WANG Runtang¹, CAI Liangcai¹, XU Wei¹, ZHOU Shaohui²

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Unit 93428, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: In order to provide a calculation method for the design of the sandwich panel structure, a three-dimensional finite element model of the sandwich panel structure of multi-layer elastic foundation is adopted by ANSYS. At the same time, the finite element model is utilized for calculating the mechanical response of the aircraft used in the typical pavement structure. The results show that the type of face plate has little effect on the mechanical response, and the contact status between the pavement and the base course greatly affects on it. The contact coefficient increases from 0.01 to 10, and the deflection of the single and double plates decreases by 17.2% and 9.9% respectively. At the same time, the tensile stress under the base is reduced by 21.7% and 27.1%. This shows that the improvement of the contact status between the pavement and the base is fatal. Finally the bearing plate test and pass test are completed. The experimental results verify the correctness of the finite element model, and provide the analytical method for the similar pavement structures.

Key words: aluminum sandwich panel; mechanical response; contact coefficient

由于道面结构力学响应分析的解析法涉及的参数多、方程复杂, 并且大多数是广义的无穷积分, 需

收稿日期: 2017-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(51578580)

作者简介: 王润唐(1994—), 男, 四川成都人, 硕士生, 主要从事机场道面研究. E-mail: 954497084@qq.com

引用格式: 王润唐, 蔡良才, 许巍, 等. 装配式铝道面板结构力学响应分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(3): 101-106.
WANG Runtang, CAI Liangcai, XU Wei, et al. An Analysis of Mechanical Response of the Aluminum Sandwich Panel[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(3): 101-106.

要相应的数学软件求出具体弯沉与应力,相比之下数值模拟法的优越性被渐渐认识。因而大量的道面结构有限元程序逐渐被用来分析拼装式道面结构力学响应,比如 WESLAYER、JSLAYER、ILLISLA、FEACONS 及 WinJULEA 程序等^[1]。但对于水泥混凝土和沥青混凝土材料的相对单一而言,拼装式道面板可能由多种不同材料制造,包括玻璃纤维、塑料、铝、膨胀泡沫等等,而且很多情况下,道面板系统是由这些材料混合构成。虽然其形式和传荷方式分别与水泥混凝土及沥青混凝土道面相似,但作用效果与这两类道面都不相同。

随着道面板材料结构、性质和飞机轮载的日益多样化,现有的力学分析模型不再适用,必须考虑道面板细部结构、接触性质、接缝影响,尤其是将道面板考虑为匀质正交各向同性材料时,道面板板底弯拉应力的计算结果会与实际情况有着较大区别。DOYLE^[2]提出了道面板与基础表面应该设置适当的接触状态,合适、准确的接触仿真对于计算结果及其重要,但对于如何设置并没有作详细解释。GARTRELL^[3]通过 ILLISLAB 程序分析了不同道面板及接缝形式的影响,通过比较分析认为不同接缝形式对于荷载作用下道面板响应起着极小的作用。TUAN^[4]利用足尺试验实际测量了折叠式玻璃钢道面板与基础以及与 C-5 飞机轮胎之间的摩擦系数。

1 有限元模型的建立

由于装配式铝道面板+稳定土基层的道面结构与水泥、沥青混凝土道面有较大区别,特别是插销锁结构的接缝形式与层间接触状态,建模时应着重加以区分。

1) 单元选取及网格划分。道面板尺寸依据现场试验板,长宽分别为 2.30 m、1.07 m。针对蜂窝铝道面板的正交各向异性以及三明治夹层结构形式,采用 SHELL181 壳单元模拟,按 30 划分网格。土基、基层采用 8 节点的 SOLID185 实体单元,采用扩大地基尺寸的方法,结合道面板尺寸,基层平面尺寸为 4.5 m×7.5 m,在水平方向按 50×50 划分网格,深度方向等厚划分为 6 层;土基的平面尺寸及水平网格划分与基层相同,沿深度方向以 0.1 的扩散率划分为 30 等份。针对板的接缝模型,选择 COMBIN40 单元^[5-6]。

2) 道面结构与轮载参数。道面板平面尺寸为 2 340 mm×1 070 mm,夹芯采用正六边形形式,蜂窝壁厚 0.2 mm,六边形边长 6 mm,模型中采用 4 种不同道面板,A 板为三铝系合金,B、C、D 板六系铝板合金,蒙皮面层厚度 A、B 为 3 mm,C、D 为 3.5 mm。

为减少计算量,通过试算确定土基深度取为 6 m 时,不会影响计算精度^[7],结构层参数见表 1^[8]。

表 1 道面结构参数

Tab. 1 Pavement structural parameters

道面结构层	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比
道面板	0.05	5 000	0.30
稳定土基层	0.2	800	0.25
稳定土底基层	0.2	500	0.25
土基	6	40	0.35

有限元计算中为了方便网格划分,施加荷载一般采用等效矩形,等效矩形尺寸按以下两式计算:

$$L_i = 0.871 2 \sqrt{P/0.052 227q} \quad (1)$$

$$W_i = 0.6 \sqrt{P/0.052 227q} \quad (2)$$

式中: L_i 为等效矩形长度(cm); W_i 为等效矩形宽度(cm); P 为机轮荷载(kN); q 为轮胎压力(MPa)。据上述分析,得到使用的飞机轮载参数见表 2^[9]。

表 2 飞机轮载参数

Tab. 2 Aircraft wheel load parameters

使用机型	飞机质量/kg	单轮荷载/kN	胎压/MPa	轮印长度/cm	轮印宽度/cm
轻型飞机	18 000	83.79	1.27	30.1	21.3
重型飞机	30 000	139.65	1.23	40.6	28.0

3) 接缝设置。美国 ERDC 对于不同的连接方式进行了相应的有限元模拟及现场试验验证,认为不同类型的连接方式对于任何道面板系统的可能弯沉及内部应力影响都很小^[10]。因此对于接缝的有限元模拟并不需要太复杂的模型,但在模拟中又不可对其忽视。文中道面板采用插销锁结构连接,依靠锁舌的刚度传递剪力。本文借鉴水泥混凝土使用传力杆接缝的方法,在接缝两侧对应节点处设置弹簧单元模拟接缝的剪力传递作用^[11],在采用 COMBIN40 单元进行模拟时通过设定不同的接缝刚度系数来模拟道面不具备传荷能力到 100%传递荷载的变化,同时也能表征不同位置接缝传荷能力的差异。

4) 接触界面设置。在受力过程中,道面板与基层间的粘结作用很小,道面板-基层界面始终处于近乎分离状态,该状态会导致道面板受到竖向荷载作用时板边翘曲,并且对飞机运行安全的影响不容忽视。同时在水平力的作用下,道面板又会产生侧滑及偏移,道面板-基层界面会产生相应的摩擦力阻止其滑动。为了表征该接触状态,通过设置 CON-TA173 单元关键参数来表示。TUAN 通过足尺试验测量了道面板与基础间摩擦系数,并在有限元建模时将道面板与沥青基层、稳定碎石的层间摩擦系

数分别设置为 0.564、0.641,与 C-5 飞机轮胎之间的摩擦系数定为 0.662^[4]。但由于沥青和稳定碎石明显较稳定土粗糙,因此本文将摩擦系数取值为一较大范围 0~0.50,方便对不同情况进行分析。

最终,针对使用轻、重 2 种机型,建立了单轮单板模型和单轮九连板模型。同时,对于不同的荷载作用(板中、板角、横边中、纵边中)位置也作了相应的分析,模型见图 1~2。

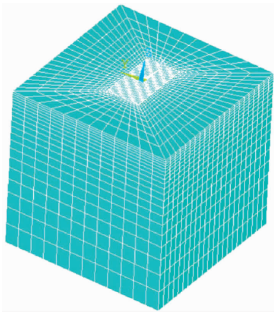


图 1 单轮单板道面结构
Fig. 1 One-wheel single panel

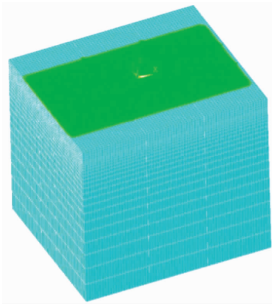


图 2 单轮九连板道面结构
Fig. 2 One-wheel nine panel

2 有限元计算结果分析

2.1 道面板类型的影响

图 3~4 分别列出了荷载作用在道面板 A~D 上的道面结构力学响应情况,从中可以看出,不同类型的道面板对结构的弯沉、基层层底弯拉应力的影响大小以及分布规律的影响都不明显,从已有研究可知道面板的差异主要体现在抗疲劳特性方面^[12-13]。

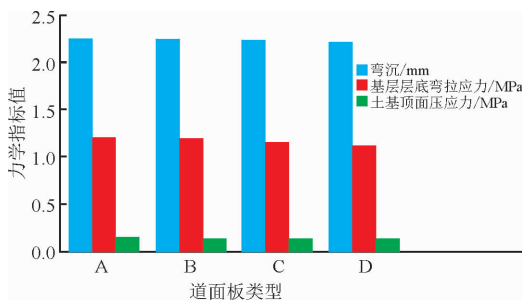


图 3 轻型飞机作用于单层基层上的道面板力学指标
Fig. 3 Panel mechanics of light aircraft on single layer

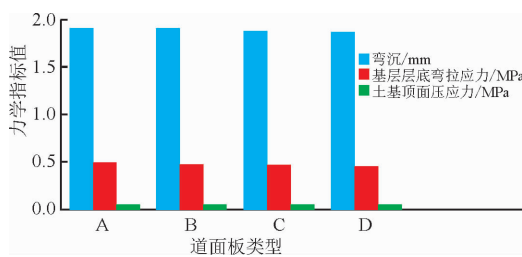


图 4 重型飞机作用于双层基层上的道面板力学指标
Fig. 4 Panel mechanics of heavy aircraft on double layer

2.2 接触界面摩擦系数的影响

以轻型飞机作用在道面板 A 上为例,采用静载单板模型对接触界面的影响进行分析。图 5 列举了部分单板模型计算结果云图。从计算结果可以看出随着摩擦系数从 0.01 增加到 0.35,单层、双层基层道面结构的弯沉和基层底部弯拉应力都有所减小。

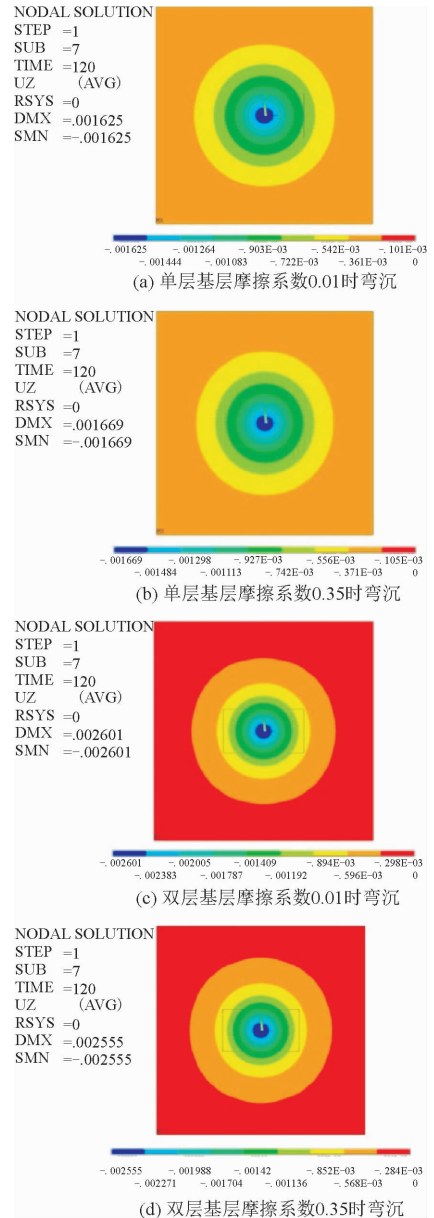


图 5 单板模型计算结果云图

Fig. 5 Single panel model calculation result images

图 6 显示了单板模型计算弯沉与接触界面摩擦系数的关系,从图中可以看出,静荷载作用下面板与基层之间的层间接触状态对道面板表面弯沉影响不可忽视。当摩擦系数为 0.01 时,道面板与基层之间视为完全光滑,单、双基层上面板弯沉分别为 2.684、1.682 mm,当摩擦系数为 10 时,道面板与基层之间视为完全连续,单、双基层上面板弯沉分别为 2.221、

1.516 mm, 差值为 0.463、0.166 mm, 弯沉分别减小了 17.2%、9.9%。

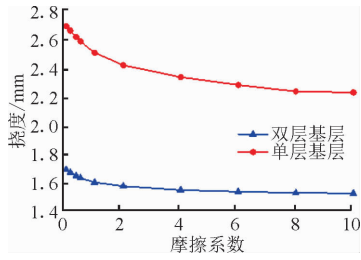


图6 弯沉随层间摩擦系数变化曲线

Fig. 6 Relationship between deflection and contact status

图7显示了单板模型基层底部弯拉应力与接触界面摩擦系数的关系,从图中可以看出,相对面板弯沉,面板与基层之间的层间接触状态对层底弯拉应力的影响更大。当摩擦系数为 0.01 时,单、双基层层底弯拉应力分别为 1.591、0.526 MPa,当摩擦系数为 10 时,单、双基层层底弯拉应力分别为 1.160、0.412 MPa,差值为 0.431、0.114 MPa,层底弯拉应力分别减小了 27.1%、21.7%。

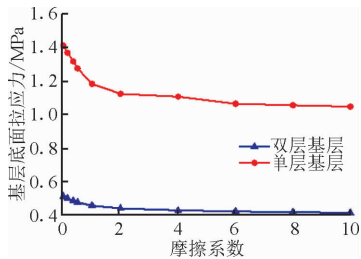


图7 层底弯拉应力随层间摩擦系数变化曲线

Fig. 7 Relationship between base layer tensile stress and contact status

分析图 6~7 中单、双基层计算结果,发现层间接触状态对单、双基层的影响都很大。当摩擦系数较小时,弯沉、层底弯拉应力等减小幅度较大,随着摩擦系数的增大,曲线逐渐平缓,基本成为一条水平线。对于装配式铝道面板,可以适当采取一些方法改善层间接触状态即可,过分强调增加道面板与基层之间的摩擦系数,不仅耗费较多,而且改善效果有限,并且不利于使用后道面板的快速拆卸等。

3 结构现场试验

为了验证有限元模型的准确性,我们在某试验中心进行了现场试验。修建了 2 条基层强度不同的室外足尺试验段,综合回弹模量分别为 70、145 MPa^[14]。铺筑 A、B、C、D 4 种装配式铝道面板,并模拟轻、重 2 种类型飞机的实际加载与通行,进行了承载能力、通行性能试验。

3.1 承载板试验

参考地基综合回弹模量测试方法——刚性承载板法,对铝道面板进行慢速静载试验,加载过程持续,达到最大荷载后卸载。模拟使用飞机轮胎作用,承载板采用 300 mm(轻型飞机)或 400 mm(重型飞机)直径的圆形刚性板。采用两辆自卸车固定 6 m 长 H 型钢梁反力架,通过承载板上的液压千斤顶逐级手动施加荷载,见图 8。测试时通过静态应变仪、数据采集仪采集,记录不同载荷时道面板各关键点的位移及应变值^[15]。



图8 加载装置示意图

Fig. 8 Loading device schematic

为了反应联锁等对道面板位移能力的影响,结合实际试验情况,如图 9 布设位移传感器,其中传感器 8~9 的位置在承载板上,由于承载板刚度大,其上受荷位移值都相等,因此传感器 8~9 的位移值也反应了蜂窝夹芯铝道面板的位移最大值,取位移传感器 8~9 的平均值作为观测数据。应变片的布设类似,主要布设在道面板上面层外部。

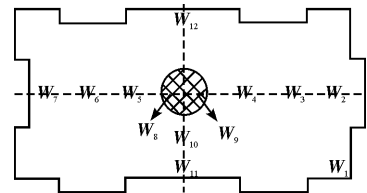


图9 单板板中位移传感器的布设

Fig. 9 Layout of displacement sensor in the center of single panel

3.2 通行试验

利用加载车拖行分别模拟轻、重飞机荷载作用,施加 2 种试验荷载:① I 型荷载 90 kN,胎压 1.27 MPa;② II 型荷载 150 kN,胎压 1.23 MPa。加载车通过牵引车以 30~40 km/h 的速度行驶。通行结束后拆卸道面板,重新测试试验段基层顶面当量回弹模量以及修补、维护试验段,铺设另一种道面继续试验。通行每 50 次后,暂停试验进行数据测量。

采用丹东虬龙传感器厂生产的动土压力盒测量基层顶面压应力,压应力传感器量程为 0.1~2.0 MPa,采用 SDY2500 高速动态数据采集分析系统采集压应力值,再根据事先标定的“压力-应变”曲线得到动土压力值,见图 10。同时在土基顶面也埋设了相应土压力盒作为对比分析。

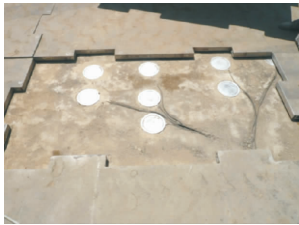


图 10 土压力盒的布设

Fig. 10 Earth pressure cell layout

4 仿真与试验结果比较

表 3 列出了静载作用下弯沉的仿真计算值与试验值,从中可以看出弯沉值的相差不大,分布趋势基本一致。分析试验值较计算值偏大的原因主要是尽管试验数据处理时已经考虑了道面板的贴合及基层表面的压实,但试验中基层表面的不平整必然会导致额外的弯沉增加。但从表中可以看出,仿真值与试验值的差值在合理范围之内,说明模型具有一定的准确性。

由于试验中,道面板与基层的贴合、蜂窝的压缩变形、基层平整度及测量手段等原因,导致弯沉测量值相对有限元模拟计算值偏大且差值不稳定。而基层及土基顶面压应力相对弯沉无论是计算精确性及稳定性都更能反映出道面结构力学模型的准确度。因此,本文也选择基层顶面压应力及土基顶面压应

力作为比较数据对有限元模型的准确性进行验证,并且会更加合理。

表 3 静载作用下弯沉值

Tab. 3 Deflection under static load

试验段	类型	荷载/kN	弯沉/mm			
			A	B	C	D
1	试验值	90	2.36	2.56	2.16	2.35
	仿真值	90	2.24	2.36	2.02	2.20
2	试验值	150	2.18	2.42	2.23	2.22
	仿真值	150	1.99	2.25	2.04	2.04

从表 4~5 可以看出基层顶面压应力的有限元计算值比试验值偏小,而土基顶面压应力的有限元计算值又较试验值偏大。分析主要原因是由于有限元模型对道面板-基层接触以及基层平整度的模拟更加理想化,实际上由于基层不平整及接触不完全的原因导致荷载作用面积减小引起荷载不能有效扩散,从而导致基层顶面压应力的有限元计算值较试验值偏小。同时由于分层作用承担荷载的效果,又会导致土基顶面压应力的测量值偏小。有限元解与试验值均有一定误差,但是相对误差基本都处于原点附近正常范围内的左右波动,最大为 11.94%,最小为 0.00%,基本满足工程精度要求。

表 4 基层顶面压应力

Tab. 4 Compressive stress on the top of base course

试验段	计算方法	道面板 B			道面板 D		
		板中	板纵边	板角	板中	板纵边	板角
1	有限元模型值/MPa	0.86	0.88	0.90	0.84	0.84	0.86
	试验值/MPa	0.88	0.92	0.94	0.80	0.86	0.88
	相对误差/%	2.27	4.35	4.26	1.18	2.33	2.27
2	有限元模型值/MPa	1.16	1.18	1.20	1.14	1.16	1.18
	试验值/MPa	1.16	1.26	1.34	1.21	1.29	1.34
	相对误差/%	0.00	6.35	10.45	5.78	10.08	11.94

表 5 土基顶面压应力

Tab. 5 Compressive stress on the top of subgrade

试验段	计算方法	道面板 B			道面板 D		
		板中	板纵边	板角	板中	板纵边	板角
1	有限元模型值/MPa	0.138	0.139	0.140	0.138	0.142	0.146
	试验值/MPa	0.124	0.128	0.127	0.132	0.129	0.131
	相对误差/%	-11.29	-8.59	-10.23	-4.54	-10.08	-11.45
2	有限元模型值/MPa	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059
	试验值/MPa	0.054	0.058	0.055	0.054	0.055	0.056
	相对误差/%	-9.26	-1.72	-7.27	-9.26	-7.27	-5.36

综上,不论是道面板弯沉值、基层顶面压应力还是土基顶面压应力,其计算值与实验值的相对误差

大部分小于 10%,对于工程项目能够满足精度要求,说明本文的有限元模型可以用于计算装配式铝

道面板道面结构的力学响应,为类似道面结构数值模拟的研究分析提供了思路。

5 结论

1)有限元模拟结果与试验数据基本吻合,说明本文所采用的模型可以用于装配式铝道面板道面结构及地基情况的力学响应分析。

2)基层表面的不平整以及与道面板间的脱空现象会导致道面结构出现较大位移及额外变形。

3)道面板的类型对弯沉与应力影响不大,板下的基础结构起决定作用。

4)随着板和基层结合程度的增加,弯沉和应力都会一定程度的下降,但随着结合程度进一步改善,弯沉和应力的下降程度有限。

参考文献(References):

- [1] WANG W, BASHEER I, PETROS K. Jointed Plain Concrete Pavement Model Evaluation[C]. TRR. Proceedings of the 2006 Transportation Research Board Annual Meeting, Ohio; 2006: 1-22.
- [2] DOYLE J D. Full-Scale Instrumented Testing and Three-Dimensional Modeling of Airfield Matting Systems[J]. International Journal of Geomechanics, 2014,6:86-95.
- [3] GARTRELL C A. Full Scale Instrumented Testing and Analysis of Matting Systems for Airfield Parking Ramps and Taxiways [R]. Vicksburg: US Army Corps of Engineers, 2008.
- [4] TUAN C Y, DASS W C. Expedient Airfield Runway Repair Using Folded Fibreglass Mat[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17 (4): 283-299.
- [5] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
WANG X M. ANSYS Engineering Structure Numerical Analysis [M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)
- [6] 蔡良才, 周少辉. 拼装式铝道面板冲击荷载作用现场试验与数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (34): 264-267.
CAI L C, ZHOU S H. In-Situ Test and Numerical Simulation of Orthotropic Aluminum Honeycomb Mat [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15 (34): 264-267. (in Chinese)
- [7] 张献民, 薛华鑫, 董倩, 等. 飞机跑道荷载响应深度变化规律[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40 (4): 427-432.

- ZHANG X M, XUE H X, DONG Q, et al. Influencing Depth under Aircraft Loads of Runway [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(4): 427-432. (in Chinese)
- [8] 蔡良才, 周少辉, 许巍, 等. 铺设拼装式铝合金道面板的道面结构加载性能[J]. 交通运输工程学报, 2015, (15)6: 1-9.
CAI L C, ZHOU S H, XU W, et al. Loading Performances of Pavement with Assembled Aluminum Mats[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, (15)6: 1-9. (in Chinese)
- [9] 翁兴中, 蔡良才. 机场道面设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007
WENG X Z, CAI L C. Airport Pavement Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [10] FOSTER D C. Decks for Rapid Runway Mat Application [R]. Wright-Patterson: US Air Force Research Laboratory, 2007.
- [11] 胡洪龙. 港口重型联锁块铺面设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
HU H L. Design Method Research of Heavy Interlocking Block Pavement in Port Area[D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese)
- [12] 许巍, 岑国平, 戴经梁. 简易机场道面结构的疲劳特性试验[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(6): 40-43.
XU W, CEN G P, DAI J L. Fatigue Characteristic Experiments of Field Airfield Pavement Structure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(6): 40-43. (in Chinese)
- [13] 刘军忠, 翁兴中, 张俊, 等. 应急机场土质道面疲劳变形特性模型试验[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(3): 412-418.
LIU J Z, WENG X Z, ZHANG J, et al. Model Experiment of Fatigue Deformation Characteristic of Emergency Soil Airfield Pavement[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(3): 412-418. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国交通运输部. JTG E60-2008 公路路面现场测试规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
Ministry of Transportation of the People's Republic of China. JTG E60-2008 Field Test Procedures for Roadbed Pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [15] 岑国平, 程传龙, 许巍, 等. 铝蜂窝道面板承载能力试验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(4): 1-4.
CEN G P, CHENG C L, XU W, et al. Experimental Study on the Bearing Capacity of the Aluminum Honeycomb Sandwich Panel[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2014, 15(4): 1-4. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)