

机场道面承载力对大型运输机 ACN 及胎压的要求

蔡良才 吴爱红 李光元 李天民

(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

(空军工程设计研究局 成都设计室, 成都 610000)

摘 要: 为了使未来的大型运输机尽量与我国现有机场道面能达到的承载力相适应,在调查大量机场道面结构类型、结构层厚度、道面承载强度、所受过的最大胎压的基础上,根据机场道面超载使用的相关规定,从尽量减少机场改造的角度,对未来大型运输机的 ACN (Aircraft Classification Number) 及胎压提出了建议值. 建立了足尺 9 块道面板三维有限元分析模型,对大型运输机采用建议值以单轮、IL-76 飞机以及 C-5 运输机等不同起落架构型作用下的道面结构响应进行了求解. 为了达到尽量少改造现有机场的目的,未来大型运输机的 ACN 在 16.1~24.2 之间取值以及胎压不高于 0.80 MPa 比较合理,现有机场道面承载力可保障其在 50% 以上的机场上正常起降.

关 键 词: 承载力; 道面等级号; 飞机等级号; 胎压; 大型运输机; 道面; 机场

中图分类号: U 412.22

文献标识码: A **文章编号:** 1001-5965(2011)09-1122-05

Requirement of ACN and tire press for future large transporter based on allowable load of present airport pavement

Cai Liangcai Wu Aihong Li Guangyuan

(Engineering Institute, Air force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Li Tianmin

(Design Academe of Chengdu, Air force Engineering Design and Research Institute, Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to make the future large transporter adapt to allowable load of present airport pavement's requirement, after a great lot of investigations on pavement structure's type, thickness, allowable load and maximal tire press accepted, advisory value of aircraft classification number (ACN) and tire press of future large aircraft was given. A 3-D finite element model which had nine slabs was established, the mechanical responses of cement concrete pavement was analyzed with advisory ACN and tire press under single wheel and main landing gear of IL-76, C-5. With the aim to reconstruct present airports as little as possible, the ACN between 16.1 and 24.2 and tire press under 0.80 MPa is reasonable for future large transporter. Allowable load of present airport pavement can ensure the future large transporter operate normally on 50 percent of present airports without reconstructing.

Key words: allowable load; PCN (pavement classification number); ACN (aircraft classification number); tire press; large transporter; pavement; airport

中国已成为运输机需求最大的市场^[1-2],从 1997 年到 2006 年,中国订购运输机 959 架,占世界总订单的 9.1%. 波音预测未来 20 年中国还需

购买运输机 3 400 架,空客也认为中国在未来 20 年需再采购运输机 2 929 架^[1]. 2006 年 2 月国务院将大型运输机项目确定为“未来 15 年力争取

得突破的16个重大科技专项”之一。2007年2月温家宝总理主持国务院常务会议,听取大型运输机重大专项领导小组关于运输机方案论证工作汇报,原则上批准大型运输机研制重大科技专项正式立项,同意组建大型客机股份公司。2008年5月11日,中国商用飞机有限责任公司在上海揭牌成立,标志着中国大型运输机研制工作开始实质性启动^[1]。

机场是飞机运行的保障基地,目前我国有机场大小数百个,未来大型飞机与现有机场道面的适应性还需要深入研究。一方面,飞机设计部门为了提高飞机性能,会尽可能提高大型运输机的运载能力,势必对道面承载力提出更高要求;另一方面,机场管理部门期望未来的大型飞机可直接在大部分机场上正常起降,尽可能减少对有机场的改造。本文通过对我国机场的道面承载力进行调查分析,按照道面超载使用的相关规定,建立足尺9块道面板三维有限元模型,分析未来大型运输机采用不同的起落架构型作用于道面板不同位置的道面结构响应,评估现有有机场道面保障未来大型运输机正常运行的能力,为中国未来大型运输机的研制提供合理的建议。

1 道面结构调查与分析

1.1 面层材料及厚度

我国机场以水泥混凝土道面为主,在调查的140个机场中,水泥混凝土道面机场130个,沥青混凝土道面机场9个,其它类型1个。一般来说,跑道道面较停机坪、滑行道道面要薄,因此本文主要研究水泥混凝土机场跑道道面。在调查的48个水泥混凝土道面机场中,道面厚度频数分布如图1,统计结果见表1。道面最大厚度50cm,最小厚度16cm,平均厚度为24.9cm。

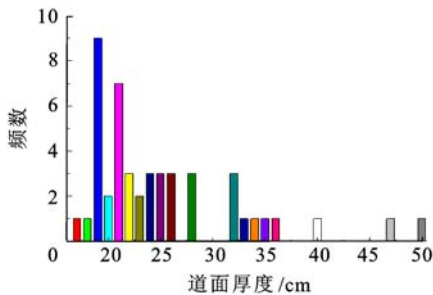


图1 道面厚度频数分布图

1.2 基层材料及厚度

基层对道面结构的承载力影响很大,此次共调查了53个机场(57条跑道)道面结构的基层材料,类型多样,主要有级配砂砾石、级配碎石、水稳

基层、砾石、卵石等,各型材料比例见表2所示。对57条跑道的基层总厚度进行了统计分析,其频数分布如图2所示,统计结果见表3,最大厚度87cm,最小厚度10cm,均值35.1cm。

表1 道面厚度统计表

| 道面厚度/cm | 数目 | 百分比/% |
|---------|----|-------|
| 20以下 | 12 | 25.0 |
| 20~22 | 9 | 18.8 |
| 22~24 | 5 | 10.4 |
| 24~26 | 6 | 12.5 |
| 26~29 | 6 | 12.5 |
| 29~33 | 3 | 6.3 |
| 33以上 | 7 | 14.3 |

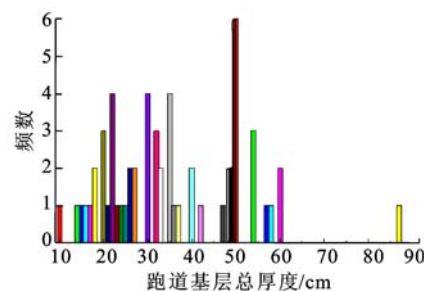


图2 基层总厚度频数分布图

表2 基层材料类型统计表

| 基层类型 | 数目 | 百分比/% |
|--------|----|-------|
| 旧混凝土道面 | 6 | 10.5 |
| 级配砂砾石 | 23 | 40.4 |
| 级配碎石 | 11 | 19.3 |
| 水稳基层 | 10 | 17.6 |
| 其他 | 5 | 12.3 |

表3 基层总厚度统计表

| 基层总厚度/cm | 数目 | 百分比/% |
|----------|----|-------|
| 20以下 | 10 | 17.5 |
| 20~26 | 8 | 14.0 |
| 26~30 | 8 | 14.0 |
| 30~36 | 9 | 15.8 |
| 36~40 | 4 | 7.0 |
| 40~50 | 10 | 17.5 |
| 50以上 | 8 | 14.0 |

2 跑道 PCN 及受过的最大胎压

2.1 道面 PCN 调查

PCN (Pavement Classification Number) 是道面可安全承受的推导单轮质量(以t计)的两倍^[3],轮胎压力规定为1.25MPa。刚性道面规定混凝土弯拉强度为2.755MPa。共调查了54个机场跑道的PCN值,统计结果见表4,其中PCN最大值为95,最小值为8,均值为29.96。

2.2 最大胎压调查

对34个机场曾经使用过的飞机进行调查,飞

机种类多达数十种,几乎涵盖了我国各个历史时期的飞机.对各个机场曾经使用飞机的胎压进行统计,确定出各个机场承受过的最大胎压^[4].根据统计分析结果,我国机场承受过的最大胎压分布在 0.49 MPa 与 1.08 MPa 之间,均值为 0.92 MPa.

表 4 道面结构 PCN 统计表

| PCN 值 | 数目 | 百分比/% |
|---------|----|-------|
| 15 以下 | 5 | 10.0 |
| 15 ~ 20 | 14 | 28.0 |
| 20 ~ 25 | 13 | 16.0 |
| 25 ~ 50 | 10 | 20.0 |
| 50 以上 | 8 | 16.0 |

2.3 ACN 值与胎压建议值

根据道面超载使用的相关规定,如果飞机的 ACN (Aircraft Classification Number) 值小于或等于道面的 PCN 值,则表示该飞机可以不受限制地使用该道面.如果飞机的 ACN 值大于道面的 PCN 值,即表示超载,此时要视超载多少予以限制(减载或限制运行次数)或禁止使用^[3].

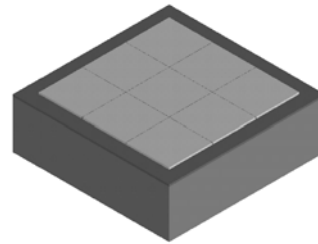
国外运输机轮胎普遍采用中压甚至低压,胎压一般在 0.8 MPa 以下.据调查分析,我国 80% 的机场承受过的最大胎压在 0.8 MPa 以上,因此,参考国外运输机胎压值以及我国道面承受胎压的情况,未来大型运输机的胎压以不高于 0.8 MPa 为宜.根据道面结构参数的调查,我国 20% 的现有机场道面厚度在 19 cm 以下,50% 的道面厚度在 24.9 cm 以下,面层较薄,基层以砂砾石居多,道面结构承载力不是很高,20% 道面的 PCN 值在 17.8 以下,为保障未来大型运输机能在大部分机场上正常起降,PCN 值不宜太高,按道面超载使用规定,ACN/PCN 按 1.0 ~ 1.5 之间考虑,PCN 取 17.8,ACN 可在 17.8 ~ 26.7 之间取值,根据标准胎压 1.25 MPa 以及未来运输机拟采用的胎压 0.8 MPa 调整 ACN 值,理想的 ACN 取值区间为 16.1 ~ 24.2.

3 道面结构有限元分析

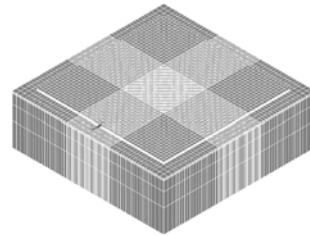
3.1 9 块道面板模型

建立足尺 9 块板道面有限元模型,道面尺寸 4.5 m × 4.5 m.按总面积相等的原则,假定轮胎接触面积为矩形,道面结构层间完全连续接触,不考虑接触界面分离及破坏.为了精确模拟道面结构的真实受力状态,模型考虑接缝的传载效应^[5],采用 Solid45 实体单元以接缝材料模拟传递剪力和弯矩,传载系数纵向横向均为 0.7,接缝宽度

0.03 m,接缝材料竖向厚度为面层厚度的 3/5.中心道面板按 45 × 45 × 5 划分网格,与中心道面板共接缝的道面板按 45 × 15 × 5 划分网格,其余道面板按 15 × 15 × 5 划分网格,基层及土基从道面边缘外延 1.35 m,在水平方向划分网格与道面对应,基层沿深度等厚划分为 3 层,土基厚 5 m,沿深度方向按 1 m,1.5 m,2.5 m 依次划分网格,物理模型及网格划分见图 3^[6-9].



a 物理模型



b 网格划分

图 3 9 块板道面物理模型及网格划分

3.2 计算参数确定

可供大型运输机正常起降的机场所占百分比记为 P ,即保障大型飞机正常起降的保障率.分别求解 P 为 50% 与 80% 时大型运输机采用 ACN 及胎压建议值作用于道面结构时的力学响应.根据统计结果,在调查的 48 个水泥混凝土道面机场中,80% 的道面厚度在 19.0 cm 以上,50% 的道面厚度在 24.9 cm 以上;53 个机场(57 条跑道)中 80% 的基层总厚度在 20.3 cm 以上,50% 的基层总厚度在 35.1 cm 以上.根据 ACN 值 16.1 ~ 24.2 推导当量单轮荷载为 78.9 ~ 118.6 kN,考虑动载系数^[3] 1.20 后当量单轮荷载为 94.67 ~ 152.32 kN.按胎压 0.8 MPa,求得轮胎接触面积 0.118 ~ 0.178 m²,道面结构层及荷载参数见表 5、表 6.

表 5 道面结构层参数

| 道面结构层 | 厚度/cm | | 弹性模量/MPa | 泊松比 |
|-------|------------|------------|----------|------|
| | $P = 80\%$ | $P = 50\%$ | | |
| 道面 | 19 | 24.9 | 36000 | 0.15 |
| 接缝 | 11.4 | 14.94 | 27 | 0.3 |
| 基层 | 20.3 | 35.1 | 400 | 0.25 |
| 土基 | 500 | 500 | 30 | 0.35 |

表6 荷载参数

| ACN 值 | 荷载/kN | 轮胎 | | |
|-------|--------|-------------------|-------|------|
| | | 面积/m ² | 长度/m | 宽度/m |
| 16.1 | 94.67 | 0.118 | 0.395 | 0.30 |
| 24.2 | 152.32 | 0.178 | 0.593 | 0.30 |

3.3 轮载位置及构型

在复杂起落架构型多轮荷载作用下,道面结构产生的力学响应与单轮起落架作用下产生的力学响应不完全一样^[5]. 由于未来大型运输机的起落架构型尚不确定,本文拟采用 IL-76 飞机以及美国 C-5 运输机作为计算参考,通过 9 块道面板的三维有限元模型,对未来大型运输机以单轮、IL-76 飞机及 C-5 运输机起落架等不同起落架构型作用下的道面结构响应进行求解,分别计算横缝板边中部、纵缝板边中部、板角以及板中 4 个位置的道面应力,计算位置如图 4 所示. IL-76 飞机及 C-5 运输机的主起落架构型如图 5 所示^[10].

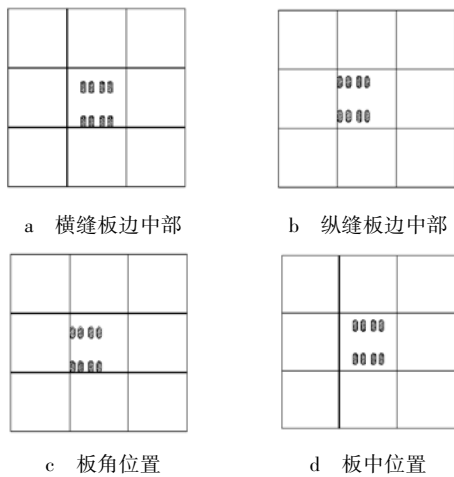


图4 不同计算位置示意图

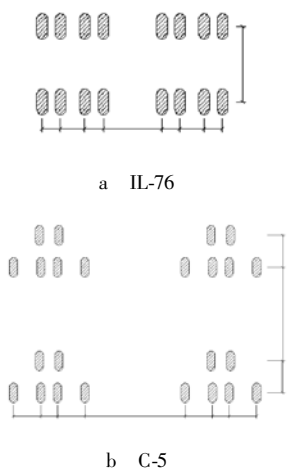
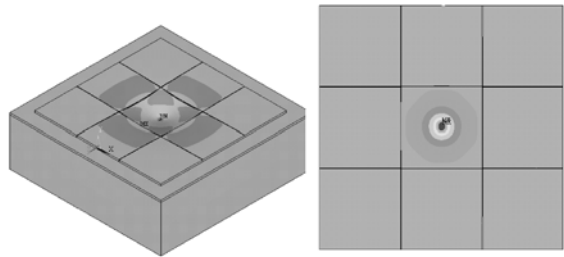


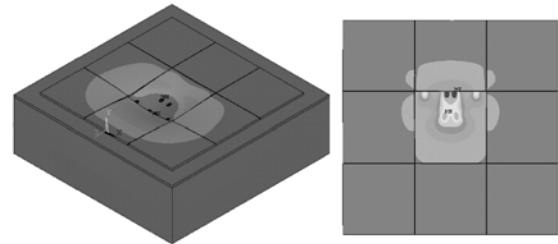
图5 IL-76 及 C-5 主起落架构型图

3.4 道面结构响应分析

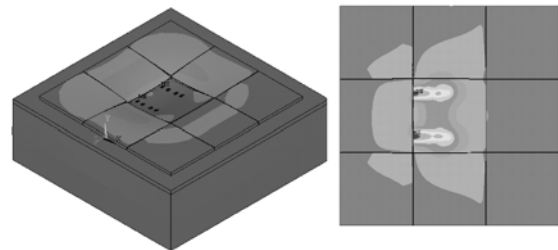
部分应力分布云图如图 6 所示,其他应力结



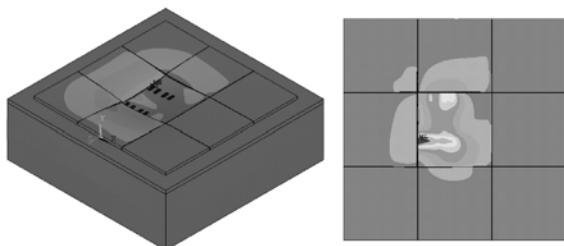
a 单轮荷载,ACN 值为 16.1,道面 19 cm 厚,基层 20.3 cm 厚,板中



b C-5 运输机主起落架,ACN 值为 16.1,道面 19 cm 厚,基层 20.3 cm 厚,横缝板边中部



c IL-76 飞机主起落架,ACN 值为 16.1,道面 24.9 cm 厚,基层 35.1 cm 厚,纵缝板边中部



d IL-76 飞机主起落架,ACN 值为 24.2,道面 24.9 cm 厚,基层 35.1 cm 厚,板角

图6 道面板顶及板底应力云图

果如表 7、表 8 所示. 道面的允许弯拉强度采用混凝土 ± 90 d 弯拉强度 (28 d 弯拉强度 5.0 MPa^[11] 乘以 1.1) 来确定^[3], 取 5.5 MPa. 分析表明,道面厚度 19 cm,基层厚度 20.3 cm 时,单轮荷载作用下道面承载力基本满足要求,但在 IL-76 飞机及 C-5 运输机起落架作用下,道面板底应力普遍较大,超出了道面的允许弯拉强度,如表 7 所示,可见在不改造现有道面结构的前提下,保障未来大型运输机在 80% 以上的机场上正常起降的目标难以实现. 道面厚度 24.9 cm,基层厚度 35.1 cm 时,单轮

荷载、IL-76 飞机及 C-5 运输机起落架作用下,道面板底应力低于道面的允许弯拉强度,如表 8 所示,不会造成道面结构破坏.因此,如果未来的大型运输机 ACN 在 17.8~26.7 之间取值,胎压不高于 0.80 MPa,并采用合理的起落架构型,在不对道面结构进行改造的情况下,保障其在 50% 以上的现有机场上正常起降是可行的.

表 7 板底应力(道面 19 cm,基层 20.3 cm)

| 起落架构型 | ACN 值 | 不同荷载位置的板底应力/MPa | | | |
|-------|-------|-----------------|------|------|------|
| | | 横缝板边 | 纵缝板边 | 板角 | 板中 |
| 单轮 | 16.1 | 4.34 | 4.53 | 2.48 | 2.84 |
| | 24.2 | 5.55 | 5.80 | 3.43 | 3.96 |
| IL-76 | 16.1 | 4.87 | 6.01 | 6.05 | 4.82 |
| | 24.2 | 6.65 | 7.88 | 8.07 | 6.49 |
| C-5 | 16.1 | 4.71 | 5.79 | 4.54 | 4.96 |
| | 24.2 | 6.25 | 7.68 | 5.99 | 6.76 |

表 8 板底应力(道面 24.9 cm,基层 35.1 cm)

| 起落架构型 | ACN 值 | 不同荷载位置的板底应力/MPa | | | |
|-------|-------|-----------------|------|------|------|
| | | 横缝板边 | 纵缝板边 | 板角 | 板中 |
| 单轮 | 16.1 | 2.77 | 2.88 | 1.52 | 1.79 |
| | 24.2 | 3.60 | 3.75 | 2.14 | 2.52 |
| IL-76 | 16.1 | 3.73 | 3.90 | 3.94 | 3.10 |
| | 24.2 | 5.18 | 5.2 | 5.38 | 4.51 |
| C-5 | 16.1 | 3.27 | 4.05 | 3.07 | 3.40 |
| | 24.2 | 4.47 | 5.50 | 4.18 | 4.76 |

4 结 论

1) 国内机场道面以水泥混凝土为主,占 90% 以上,现有机场 20% 的道面厚度在 19 cm 以下,50% 的机场道面厚度在 24.9 cm 以下.基层材料主要采用级配砂砾石、级配碎石,两者共占到 60% 左右,20% 的机场基层总厚度在 20.3 cm 以下,50% 的机场基层总厚度在 35.1 cm 以下.

2) 我国大部分机场面层较薄,基层以级配砂砾石居多,承载力不高,20% 的道面 PCN 值在 17.8 以下,80% 的道面受过的胎压在 0.80 MPa 以上,为保障未来的大型运输机在大部分机场上正常起降,尽量减少对现有机场的改造,据道面超载使用规定,其 ACN 值可考虑在 16.1~24.2 之间取值,胎压以不高于 0.80 MPa 为宜.

3) 建立 9 块道面板的三维有限元模型,计算了大型飞机采用 ACN 值及胎压建议值以单轮、IL-76 及 C-5 主起落架作用于横缝与纵缝板边中部、板角及板中时的道面结构响应.结果表明,在不改造现有道面结构的前提下,大型运输机可以

在 50% 以上的机场上正常起降.

参考文献 (References)

- [1] Andersen P. China's growing market for large civil aircraft, office of industries [R]. ID-18, 2008
- [2] McKenzie B. Flying high: china's aviation industry [EB/OL]. Beijing: the American Chamber of Commerce in People's Republic of China, 2006 [2010-04-20]. <http://www.amcham-china.org.cn/amcham/show/content.php?Id=109&menuid=04&submid=04>
- [3] 翁兴中,蔡良才.机场道面设计[M].北京:人民交通出版社,2007:294-360
Weng Xingzhong, Cai Liangcai. Airport pavement design [M]. Beijing: China Communications Press, 2007:294-360 (in Chinese)
- [4] 卢成文.世界飞机手册[M].北京:航空工业出版社,1997:243-349
Lu Chengwen. World's aircraft handbook [M]. Beijing: China Aviation Industry Press, 1997:243-349 (in Chinese)
- [5] 凌建明,刘文,赵鸿铎.大型军用飞机多轮荷载作用下水泥混凝土道面的结构响应[J].土木工程学报,2007,40(4):60-65
Ling Jianming, Liu Wen, Zhao Hongduo. Mechanical responses of rigid airport pavement to multiple gear military aircraft loadings [J]. Chins Civil Engineering Journal, 2007, 40(4):60-65 (in Chinese)
- [6] Brill DR, Hay hoe G F, Lee X. Three-dimensional finite element modeling of rigid pavement structures [C]// The 1997 Airfield Pavement Conference. Seattle: ASCE, 1997:151-165
- [7] Hammons M I. Advanced pavement design: finite element modeling for rigid pavement joints, report II: model development D. R. Brill, Field Verification of a 3D Finite Element Rigid Airport Pavement Model [D]. Washington: Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 1998:1-72
- [8] Brill D R, Parsons I D. Three-dimensional finite element analysis in airport pavement design [J]. The International Journal of Geomechanics, 2001, 1(3):273-290
- [9] 李巧生,王德荣,李杰,等.水泥混凝土道面结构在多轮荷载作用下的响应分析[J].振动与冲击,2010,29(2):75-78
Li Qiaosheng, Wang Derong, Li Jie, et al. Response analysis of a cement concrete pavement structure with multi-wheel loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2):75-78 (in Chinese)
- [10] 翁兴中,焦明声.军用机场水泥混凝土道面结构参数变异性[J].公路交通科技,2004,20(2):5-13
Weng Xingzhong, Jiao Mingsheng. Variability analysis of military airfield concrete pavement structure parameters [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 20(2):5-13 (in Chinese)

(编辑:张 嵘)