

DOI: 10.11779/CJGE2019S1026

飞机移动荷载作用下跑道地基响应范围变化规律

张甲峰^{1, 2}, 钱建固², 吕玺琳², 李 帅³, 李军世¹, 苏尔好⁴

(1. 上海民航新时代机场设计研究院有限公司, 上海 200335; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 机械工业信息研究院, 北京 100037; 4. 上海华东民航机场建设监理有限公司, 上海 200335)

摘要: 针对目前机场场道工程设计中未考虑飞机移动荷载特性、道面结构及地基土特性与土基影响深度之间关系的状况, 基于国际平整度指数 IRI 的飞机移动荷载计算理论和层状弹性体系理论, 构建了考虑道面结构—土基—飞机移动荷载的动力分析模型。系统分析了不同道面结构和不同机型在土基顶面产生的最大附加动应力分布规律, 获得了飞机移动过程中最大附加动应力横向影响范围及随深度的变化规律。研究结果为机场场道工程设计及优化提供了理论依据和参考。

关键词: 飞机移动荷载; 起落架; 响应深度; 跑道; 分层路基

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0101-04

作者简介: 张甲峰(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事机场工程研究。E-mail: jiafeng6060@163.com。

Influence scope of airport runway ground under aircraft moving loads

ZHANG Jia-feng^{1, 2}, QIAN Jian-gu², LÜ Xi-lin², LI Shuai³, LI Jun-shi¹, SU Er-hao⁴

(1. Shanghai CAAC New Era Airport Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Machinery Industry Information Institute, Beijing 100037, China;
4. Shanghai East China Civil Aviation Airport Construction Supervision Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: The relationship among aircraft moving loads, pavement structures, characteristics of foundation soils and influence depths of soil foundations is accounted in the design of airport runways. Based on the international smoothness index and the theory of layered elastic system, a dynamic analysis model considering the moving loads of pavement structures, soil foundations and aircrafts is established. The distribution laws of the maximum additional dynamic stress on the top surface of soil foundations caused by different pavement structures and different aircraft types are systematically analyzed. The lateral influence range of the maximum additional dynamic stress and its variation with depth in the process of aircraft movement are obtained. The research results can provide theoretical basis and reference for the design and optimization of airport runways.

Key words: aircraft moving load; landing gear; response depth; runway; layered subgrade

0 引言

国内外实测资料均已表明交通荷载作用下的软土地基发生了很大的工后沉降(上海地铁一号线^[1]、浦东国际机场一跑道^[2]及日本某低路堤高速公路^[3])。现行交通工程在采取了地基加固处理或减少静载措施的情况下仍然产生了如此大的工后附加沉降, 可见交通荷载引起的动应力起到了较大的作用。

随着我国民用航空事业的发展, 民用运输机日趋大型化, 机场起降架次亦日益增多, 这对现有的设计体系提出了新的要求, 特别是针对软土地基设计要求, 为应对这一发展趋势, 确保机场跑道运行安全, 建立适应现代大型枢纽机场跑道工程的设计理念已迫在眉睫。而关于飞机移动荷载作用下引起的场道地基受力特性的研究尚不多见, 现行场道地基设计规范中也未

考虑飞机移动荷载的影响。

在路基工程中, 路面结构的主承载区即为路基工作区^[4], 其深度由轮载引起的竖向附加应力与路基土自重应力的比值确定, 比值通常为 0.1~0.2。据此, 在机场场道工程中, 笔者类比提出飞机动载响应深度的判别标准。

道面结构与土基强度参数不同, 荷载影响深度也不同^[5], 事实上, 场道地基附加应力和影响深度受多种因素影响, 主要有飞机荷载特性、道面结构、土体特性三大方面。本文基于层状弹性体系理论和国际平

基金项目: 国家自然科学基金项目(51238009, U1433123, 51578413);

民航局科技项目(MHRD201055); 上海市科委项目(10231000900)

收稿日期: 2019-04-28

*通讯作者 (E-mail: jiafeng6060@163.com)

整度指数 IRI 的飞机动载系数, 借助 MATLAB 语言编程对不同工况下飞机动载引起的最大附加动应力进行计算分析, 系统地分析了不同道面结构—土基—飞机动载引起的附加动应力特性, 主要研究了相同土层条件下, 不同道面结构和不同机型引起的地基土顶面附加动应力特性、横向影响范围及其影响深度的变化规律。

1 飞机移动荷载计算理论

1.1 动荷载系数定义

跑道道面不是绝对的平面, 飞机在跑道上运行时, 不可避免地产生附加动载, 为了定量描述飞机运行过程中产生的动荷载, 以飞机静止荷载为基准定义动荷载系数 k_d :

$$k_d = \frac{P_d}{P_s} , \quad (1)$$

式中, P_s 为飞机静止荷载 (kN), P_d 为飞机运行过程中产生的对道面的竖向动荷载 (kN)。

文献[2]建立了飞机动载与国际平整度指标 IRI 之间的定量关系。在飞机滑跑移动过程中, 道面实际承受的竖向荷载与道面不平整度、飞机滑跑速度以及飞机升力等因素有关。通过考虑飞机滑跑移动过程中的整体受力平衡, 得到了考虑浮力和飞机移动特征的动荷载系数 k_d :

$$k_d = 1 + 0.0207 \text{IRI} \sqrt{v} - \frac{v^2}{v_0^2} (1 + 0.0207 \text{IRI} \sqrt{v_0}) , \quad (2)$$

式中, v 为飞机运行速度, v_0 为飞机离地起飞的速度 (m/s)。

1.2 动荷载系数分析

《民用机场道面评价管理技术规范》(MH/T5024—2009) 依据国际平整度指标 IRI 将道面分成三个等级, 取 IRI 平均值 (m/km) 为 1, 3, 5 分别代表道面平整度状况为好、中、差三种道面状态, 假定飞机起飞离地速度为 85 m/s, 依据动荷系数公式计算分析飞机加速起飞滑跑状态下三种 IRI 值对应的最大动荷载系数列于表 1。

表 1 飞机动荷载系数 k_d 最大值

Table 1 Maximum values of coefficient of aircraft dynamic loads

k_d	1	3	5
IRI 值/(m·km ⁻¹)	1.0490	1.1931	1.3550

由表 1 可知, 道面的国际平整度指数 IRI 对飞机动荷载系数有显著的影响, 道面平整度指数 IRI 越大, 动荷载系数越大, 这与美国国家航空实验中心的测试结果^[6] (见表 2) 较为吻合。

表 2 实测动荷载系数 k_d

Table 2 Parameters for runways and soil layers

运动形式	低速	加速起飞	减速	低速制	高速
	滑行	滑跑	滑跑	动	制动
动荷载系数	1.3	1.2	1.2	1.3	1.8

综合上述数值分析和文献数据情况, 考虑民用运输机型性能、机场跑道平整度情况, 同时考虑飞机运行安全的需要, 动载系数依据中等道面平整度不利状态下进行计算, 滑跑状态下动载系数取 1.2。

2 飞机移动荷载应力分析原理

2.1 飞机移动荷载时空等效转换

随着飞机轮载的移动, 土体单元的应力状态随之发生连续的变化, 主应力轴发生连续的旋转。在一个飞机荷载作用周期内, 不同时刻的土体单元的动应力状态, 可等效成飞机轮载作用的某一时刻下不同水平位置土单元的受力状态, 如图 1 所示。通过时空效应转换, 可求得飞机轮载移动过程中任一位置土体单元的动应力状态。

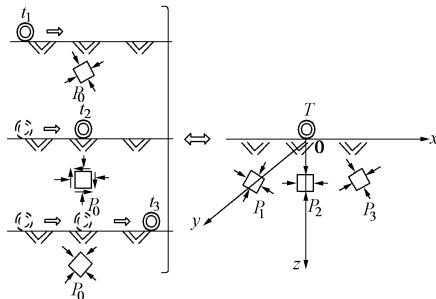


图 1 时空等效转化

Fig. 1 Equivalent spatial-temporal transformation

2.2 地基应力

文献[7]给出了柱面坐标系下单轮荷载的各个应力分量, 通过坐标转换可得直角坐标系下的应力形式。由于飞机移动, 在 xoz 平面内引起主应力轴偏转, 这里重点考察 xoz 平面的应力状态, 而忽略垂直于 xoz 平面的应力, 因此, 广义剪应力 q 可表示为

$$q = \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4\tau_{xz}^2} , \quad (3)$$

式中, 广义剪应力 q 大小为心形轨迹到原点的距离, 其与水平轴的夹角为 2 倍的主应力方向角 θ_σ (见图 2)。

3 典型机型与相应道面结构参数选取

场道地基附加应力受多种因素影响, 主要有飞机荷载特性、道面结构、土体特性三大方面。目前, 常见的飞行区跑道等级有 4C、4D、4E、4F, 根据飞行区跑道等级, 选取典型的道面结构及相应的常用机型对场道地基附加应力分布规律进行分析, 道面结构层

及土基参数见表 3, 典型机型参数见表 4。

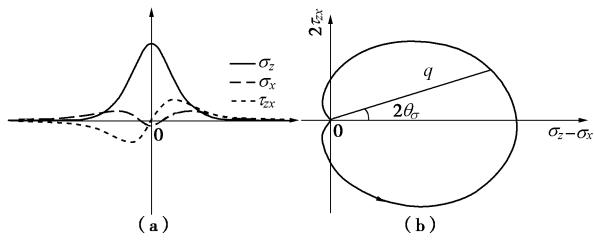


图 2 应力分量及偏应力路径

Fig. 2 Stress components and paths of deviator stress

表 3 道面结构层及土基参数

Table 3 Parameters for pavement structures and soils

飞行区 指标	分层 名称	厚度/m	泊松 比	弹性模量 /Pa
4C、4D、 4E、4F	面层	0.32(4C)、0.36(4D) 0.4(4E)、0.42(4F)	0.15	3.0×10^{10}
	基层	0.4	0.20	1.3×10^9
	地基土	40	0.30	1.0×10^7

表 4 典型机型荷载参数

Table 4 Parameters of typical aircraft loads

飞行区 指标	代表机型	最大滑行 重量/kN	主轮 轮载 /kN	主轮着 地面积 /m ²	主轮着 地压强 /kPa
4C	A321-200	834	198.1	0.1500	1360
4D	B767-300ER	1873	222.4	0.1612	1380
4E	B747-400	3978	236.2	0.1700	1380
4F	A380-800F	5920	281.2	0.1900	1494

4 机型对地基土平面响应范围的影响

图 3 为 F 类典型机型 A380-800F 荷载作用下土基顶面附加动应力分布图, 图 4 为各类代表机型荷载作用下地基顶面处附加应力横向分布对比图。从图 3, 4 可知: 飞机荷载不同, 附加应力横向影响范围亦不相同, 飞机荷载越大, 附加应力横向影响范围越大; C, D, E, F 类机型横向影响范围在中心线两侧各 15~25 m 之间, 超过 25 m, 附加应力可以忽略不计。飞机起落架构型不同, 附加应力影响范围不同。

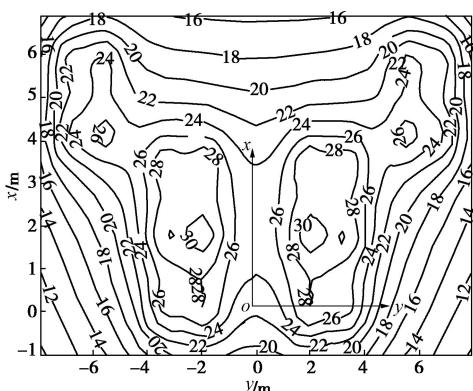


图 3 A380-800F 移动荷载作用下土基顶面附加应力

Fig. 3 Additional stresses on top surface of soil foundation under A380-800F aircraft moving loads

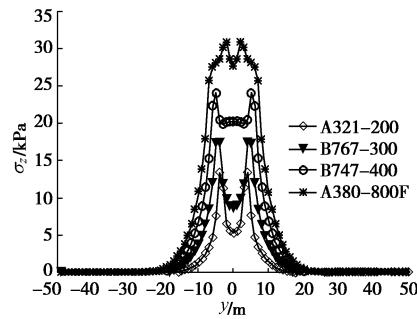


图 4 各代表机型荷载作用下典型横断面附加应力分布对比图

Fig. 4 Comparison of additional stress distribution in a typical cross section under various representative loads

5 机型对地基土响应深度的影响

移动荷载对场道地基的影响深度是研究飞机交通荷载作用下场道地基沉降的重要依据之一, 特别是对于软土地基的处理具有重要的指导意义。目前, 对于影响深度的界定标准主要以某一深度处的附加动应力或动应变的绝对值作为判定依据^[4], 有的也以附加动应力与自重应力的相对百分比或者附加动应变占自重应变的百分比作为判定依据。目前, 动应力响应通常采用现场测试或者数值模拟得到, 而现场动应力测试结果尚不多见, 动应变测试数据就更少, 且采用不同处理方法得到的数值结果差异性较大, 从而得到的影响深度结论可采用性较差。根据现有文献, 现场动力测试结果显示动应力有效影响深度在 1~2.5 m^[5, 8], 这与采用数值分析法得到的影响深度差别较大, 用竖向动应力标准界定影响深度为 6~8 m, 用竖向动应变标准界定影响深度可达 18 m^[9-11]。

附加应力与自重应力比值小于某一定值(10%或 20%)的界定标准概念较为清晰, 应用较为广泛。而其他判定标准, 采信性较低。故本文在运用分层总和法进行分析时, 采用 10% 的应力比值进行计算分析。图 5 为各典型飞机移动荷载作用下附加应力与 10% 自重应力沿深度分布曲线图, 可知, 飞机荷载不同, 移

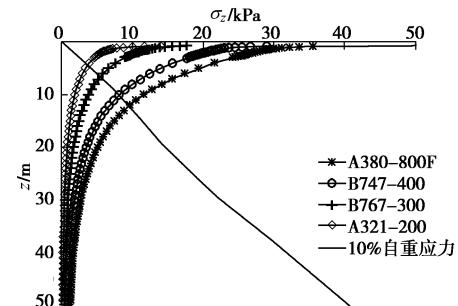


图 5 各机型荷载作用下土基附加应力分布对比图

Fig. 5 Comparison of additional stress distribution under various representative loads

动荷载影响深度也不相同, 荷载越大, 影响深度越深, 对于 C, D, E, F 类机型其移动荷载影响深度分别为 4, 7, 10, 12 m。

6 结 论

基于国际平整度指数 IRI 的飞机移动荷载计算理论和层状弹性体系理论, 考虑道面结构—土基—飞机移动荷载的耦合作用, 系统地分析了相同土层条件下, 不同机型作用在相应道面结构上引起的地基土附加动应力分布规律。基于以上研究, 可以得到以下结论:

(1) 对于特定机型, 地基动应力影响因素主要包括荷载的移动速度、道面结构平整度及跑道—地基分层特性等。求解飞机动载下地基附加动应力, 有必要将飞机—道面结构—地基进行耦合, 获得基于荷载速度、道面平整度等综合影响下的动荷载系数, 由此计算的动载系数与国际相关规范实测的建议值相吻合。

(2) 相同土层条件下, 对应不同跑道等级, C, D, E, F 类机型横向影响范围在中心线两侧各 15~25 m 之间, 超过 25 m, 飞机荷载影响可忽略不计。

(3) 相同土层条件下, 对应不同跑道等级, 飞机荷载不同, 移动荷载影响深度也不同, 荷载越大, 影响深度越深, 采用附加应力与自重应力比值小于 10% 的标准来界定影响深度时, F 类飞机荷载影响深度可达 12 m, E 类飞机荷载影响深度为 10 m, 能够影响到地基下卧软土层, 在进行场道地基沉降分析和地基处理设计时应当给予充分考虑。

参 考 文 献:

- [1] 陈基炜, 詹龙喜. 上海市地铁一号线隧道变形测量及规律分析[J]. 上海地质, 2000(2): 51~56. (CHEN Ji-wei, ZHAN Long-xi. Deformation measuring of the metro tunnel and deformation data analysis of Shanghai metro line No.1[J]. Shanghai Geology, 2000(2): 51~56. (in Chinese))
- [2] 张甲峰. 飞机移动荷载下饱和软黏土试验研究与长期沉降分析[D]. 上海: 同济大学, 2016. (ZHANG Jia-feng. Experimental study on saturated soft-clay and analysis of long-term settlement under aircraft loading[D]. Shanghai: Tongji University, 2016. (in Chinese))
- [3] YAMANOUCHI T, YASUHARA K. Settlement of clay subgrades of low bank roads after opening to traffic[C]// Proceeding of 2nd Australia and New Zealand Conference on Geomechanics. Australia: Brisbane, 1975: 115~120.
- [4] 仇敏玉, 俞亚南. 道路行车荷载响应深度分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1822~1826. (QIU Min-yu, YU Ya-nan. Analysis of influence depth for roads induced by vehicle load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1822~1826. (in Chinese))
- [5] 赵俊明, 刘松玉, 石名磊, 等. 交通荷载作用下低路堤动力特性试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(5): 921~925. (ZHAO Jun-ming, LIU Song-yu, SHI Ming-lei, et al. Experimental study on dynamic response of low embankment under traffic load[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(5): 921~925. (in Chinese))
- [6] LEDBETTER R H. Pavement response to aircraft dynamic loads[R]. United Army Engineer Waterways Experiment Station Soils and Pavement Laboratory, 1976.
- [7] 张甲峰, 黄茂松, 张根宝, 等. 往复荷载下层状地基基础与沉降分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 122~129. (ZHANG Jia-feng, HUANG Mao-song, ZHANG Gen-bao, et al. Test and analysis for settlement of plates on elastic foundation under repeated loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 122~129. (in Chinese))
- [8] 周健斌, 魏金霞, 李国强. 交通动荷载模拟试验成果分析[J]. 公路与汽运, 2005(4): 32~34. (ZHOU Jian-bin, WEI Jin-xia, LI Guo-qiang. Analysis of simulation experimental results of traffic dynamic load[J]. Highways & Automotive Applications, 2005(4): 32~34. (in Chinese))
- [9] 黎冰, 高玉峰, 魏代现, 等. 车辆荷载的影响深度及其影响因素的研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 310~313. (LI Bing, GAO Yu-feng, WEI Dai-xian, et al. Research on influencing depth of vehicle loads and its influencing factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S0): 310~313. (in Chinese))
- [10] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907~916.
- [11] 梅英宝, 朱向荣, 吕凡任. 交通荷载作用下道路与软土地基弹塑性变形分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(7): 997~1002. (MEI Ying-bao, ZHU Xiang-rong, LÜ Fan-ren. Elastoplastic deformation analysis of pavement and soft subsoil under traffic load[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(7): 997~1002. (in Chinese))

(责编: 明经平)