

DOI: 10.11779/CJGE2016S2021

# 民用机场场道路基工作区深度影响因素定量分析

杨召焕<sup>1, 2, 3</sup>, 程国勇<sup>3</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学岩土工程研究所, 天津 300072;  
3. 中国民航大学机场学院, 天津 300300)

**摘要:** 借助有限元数值分析方法求解了飞机荷载作用附加应力在民用机场场道土基分布的边值问题, 在此基础上定量地研究了飞机荷载类型、刚性道面厚度、土基回弹模量以及工作区不同定义标准对工作区深度的影响: 飞机荷载越重、起落架形式越复杂, 土基中附加应力的影响范围越大, 相应工作区深度越大; 刚性道面的厚度越大, 工作区深度越小; 土基回弹模量越大, 工作区深度越大; 刚性道面的工作区深度与刚性道面厚度、土基回弹模量之间存在良好的线性关系, 并且这种线性关系与工作区深度的定义标准有关。在上述分析的基础上, 提出了一种确定刚性道面工作区深度的简易方法, 可以规避繁琐的数值模拟。在场道的设计和建设工作中, 可以借鉴本文研究成果确定机场场道路基的工作区深度进而选取合适的路基处理深度和处理方法。

**关键词:** 工作区深度; 飞机荷载; 附加应力; 道面厚度; 土基回弹模量; 简易方法

**中图分类号:** TU416.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2016)S2-0130-06

**作者简介:** 杨召焕(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事软土动力特性及本构关系研究。E-mail: okzhyang@126.com。

## Quantitative analysis of influencing factors of subgrade service depth of civil airport runway

YANG Zhao-huan<sup>1, 2, 3</sup>, CHENG Guo-yong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Geotechnical Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3: Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** The finite element numerical analysis method is adopted to solve the boundary value problem of additional stress distribution in subsoil of civil airport runway under aircraft load, and the effects of the aircraft load types, slab thickness of rigid pavement and subsoil resilient modulus on service depth are quantitatively analyzed. Heavier aircraft load and more complicated landing gear configuration lead to greater distributional zone and corresponding service depth. The service depth decreases with the increasing slab thickness of rigid pavement, but increases with the increasing subsoil resilient modulus. The relations between the service depth and the slab thickness of rigid pavement and the subsoil resilient modulus are both linear and depend upon the definition standard of the service depth. Based on the analysis, a simple method for determining the service depth of rigid pavement is proposed to avoid the complicated numerical analysis. The findings can be referenced for determining the service depth of airport runway, subsoil treatment depth and treatment method in the design and construction practice.

**Key words:** service depth; aircraft load; additional stress; slab thickness; subsoil resilient modulus; simple method

## 0 引言

机场道面是机场最重要的基础设施, 其正常功能的发挥对航运交通安全具有重大意义。路基作为机场场道重要的组成部分, 承受着本身土石材料的自重、道面重力以及路面传递而来的飞机荷载, 因而路基工作状态直接决定了场道功能正常发挥与否<sup>[1]</sup>。为了保证路基在机场运行过程中始终处于良好状态, 其在前期场道设计及工程施工时必须具有一定的深度, 该深度必须能够分担上述自重及路面传递而来的飞机荷

载。目前, 对于场道路基深度的研究多是借鉴公路工程中工作区深度的相关研究成果, 对于民航机场场道工程中上述问题的研究尚处于起步阶段。

对于场道工程中工作区深度或者影响深度的问题, 已有学者进行过初步讨论<sup>[2-7, 9-10]</sup>。现有成果仅定性地分析了各因素对飞机荷载作用下地基附加应力和工作区深度的可能影响, 而没有进行定量分析, 给出

的工作区深度也不一致<sup>[2-6]</sup>。另外, 在进行地基附加应力计算过程中, 多针对某一特定机型或者道面形式进行分析<sup>[7]</sup>, 并未系统揭示诸如荷载等级、道面形式等因素对附加应力分布规律乃至工作区深度的影响, 甚至对于工作区深度或者影响深度的定义也未达成统一意见。因此, 仍有必要对飞机荷载作用下场道土基中附加应力分布和工作区深度问题进行深入细致的研究。

对于刚性道面, 面层模量的影响并不显著<sup>[3]</sup>, 而对于柔性道面, 面层厚度及模量和土基回弹模量的影响也不显著<sup>[4]</sup>, 因此本文的重点放在飞机荷载形式、刚性道面厚度、土基模量对工作区深度影响的定量分析上。根据分析结果, 提出一种工作区深度的计算方法, 在不进行数值模拟计算的前提下, 快速确定机场场道的工作区深度。在实际场道的设计和建设过程中, 可以借鉴本文的研究成果确定机场场道路基的工作区深度并选取合适的路基处理深度和处理方法。

## 1 有限元建模技术

解决飞机荷载作用下路基工作区深度问题的关键在于确定土基中附加应力的分布, 而该问题作为一个典型的边值问题, 可以借助有限元分析技术进行求解。

飞机荷载大小按照《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH5004—2010) 中规定的方法进行计算<sup>[8]</sup>。荷载布置形式按照面积等代的原则将椭圆形轮印转换为矩形。具体换算方法如下:

$$\begin{aligned} L &= 35.55 \cdot (P_t/q)^{1/2}, \\ W &= 26.24 \cdot (P_t/q)^{1/2}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $L$  和  $W$  分别表示矩形轮印的长度和宽度, mm;  $P_t$  为飞机主起落架轮载, 表征单只轮胎承受的飞机重量, kN;  $q$  为胎压, MPa。按照上述方法确定的机轮荷载为静荷载, 根据文献[9]的研究成果, 飞机在道面滑行的过程中会对道面产生动力效应, 动力效应放大系数可达 15%, 为考虑这种动力效应, 将计算出的飞机静载放大 15% 施加至道面上。

在场道工程中, 根据飞机最大起飞重量不同, 将飞机荷载形式分为轻型、中型和重型。显然, 飞机重量越大, 在土基同一深度处产生的附加应力值也越大。为此, 本文选择各荷载形式的代表机型进行分析, 见表 1, 考察荷载形式和主起落架型对地基附加应力分布及工作区深度的影响。随着民航交通运输业的发展, 飞机起飞重量和轴次逐年增加, 在考察面层厚度和土基模量影响时, 则直接选择目前起飞重量最大, 起落架型较为复杂的重型飞机 A380 作为典型计算

机型。

在利用有限元软件对场道道面结构层进行建模时分为四层: 面层、基层、垫层和土基。而根据面层材料不同将道面分为刚性道面和柔性道面两种, 前者道面材料为混凝土或钢筋混凝土, 后者则为沥青混凝土材料。在建模时选取上述结构层参数的典型代表值进行建模。根据前期试算发现, 当土基深度超过 20 m, 附加应力值基本可以忽略不计, 故模型沿深度方向的尺寸取 20 m。在平面尺寸跑道宽度方向取 30 m, 长度方向取 20 m。在进行起落架布置时, 将飞机左右两翼底部起落架沿其对称轴均匀地布置于场道轴线两侧。机场跑道在正常的工作时, 不允许出现塑性变形, 可以认为土体始终处于弹性状态, 建模时土基选取弹性单元, 表 2 给出了刚性道面和柔性道面典型的结构层力学参数和几何参数。

表 1 代表机型的计算参数

Table 1 Parameters of typical aircrafts

飞机类型	轻型		中型		重型	
	MD-82	B737-800	A310-200	B747-400	A380-800	
飞机重量/kN	682.6	682.6	1329.0	3798.0	5620.0	
胎压/MPa	1.28	1.28	1.46	1.38	1.47	

表 2 道面的计算参数

Table 2 Parameters of pavements

结构层名称	材料	$E/\text{MPa}$	$\nu$	计算深度/cm
面层	刚性道面 混凝土	$(3.6 \sim 3.8) \times 10^5$	0.15	20~50
	柔性道面 沥青混凝土	$(1.5 \sim 2.5) \times 10^3$	0.3	15~25
基层	碎石	800	0.3	30
垫层	二灰土	300	0.35	25
土基	压实土	20~80	0.4	约 1900

对于边界条件, 实体模型的四周约束垂直于边界面的位移, 底部为固定端约束。为了节省计算资源, 主要进行了两个方面的优化: 结合场道结构和荷载形式的对称性, 在建模时取 1/2 实体结构进行计算; 在进行网格划分时, 靠近机轮荷载的位置, 单元网格可以适当划分较密一些, 而远离机轮荷载的位置, 特别是土基较深时, 可以将网格适当划稀疏一些。通过上述处理可以很好地兼顾计算效率和计算精度<sup>[3-4]</sup>。

## 2 数值计算结果分析

### 2.1 附加应力的分布规律和工作区深度的定义

在机场场道工程中, 工作区深度与飞机荷载特性及场道结构层特性有着紧密的联系。本文选取了具有代表性的工况研究附加应力的分布规律, 并讨论了工作区深度定义问题。图 1 给出了混凝土面板高度为 35

cm, 混凝土面层回弹模量取  $3.8 \times 10^4$  MPa, 计算机型为 A380-800 飞机工况下, 路基横断面内附加应力分布。由图 1 可知, 当土基深度  $D$  在 3 m 范围内时, 附加应力沿跑道横向呈现“双驼峰”分布, 且关于跑道中心左右对称。两驼峰位置分别位于起落架底部。随着深度的增加, 起落架布置位置对附加应力分布的影响减弱, 应力值也逐渐变小, 这是由于土基扩散作用逐渐起主导作用所致。土基附加应力值最大约为 40 kPa, 小于压实后地基土的屈服强度, 这也验证了有限元建模将土基视作弹性材料的合理性。

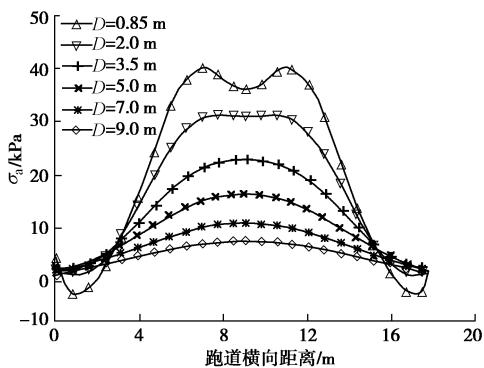


图 1 横断面内的附加应力分布

Fig. 1 Distribution of additional stress in transverse section

文献[3]将公路工程中工作区深度的概念引入到了场道工程中, 并定义附加应力占自重应力的比例减小至 10% 的深度作为场道工程的工作区深度。但文献[7]定义了类似于工作区深度的概念, 称为影响深度, 其定义方法取最小附加应力与最大附加应力之比等于 5% 的临界深度。文献[6]则选择附加应力与自重应力之比等于 5% 定义为响应深度。尽管上述三种深度名称不同, 但均是以附加应力沿深度衰减至某一比值作为判定标准, 实质均是应力判定标准。文献[10]在某机场联络道扩建工程中地基工后沉降计算时借鉴了建筑工程中条(柱)形基础沉降计算确定计算深度的方法, 该计算深度是从对沉降变形的贡献角度确定了上部飞机荷载的影响深度, 该参数仅为飞机机轮荷载分布形式和道面几何参数的函数, 并未考虑道面结构层力学参数的影响。另外, 根据图 1 可以看出, 飞机荷载引起的附加应力沿着横向分布范围很广, 单侧可达 8 m 左右, 远超按照  $45^\circ$  角扩散确定的影响深度。为了更为全面地反映飞机荷载特性和结构层力学特性的影响, 并考虑定义方法带来的不同影响, 本文仍然沿用程国勇等<sup>[3-4]</sup>提出的工作区深度的概念, 并分别取自重应力与最大附加应力之比达到 5%, 10%, 20% 三种比值定义标准, 研究工作区深度定义方法的影响。图 2 给出了起落架机轮底部位置处附加应力沿计算深度的变化规律, 显然, 定义比值越小, 确定的工作区深度

越深。按照不同的定义标准确定的工作区深度分别为: 7.75 m, 5.62 m 和 3.78 m。

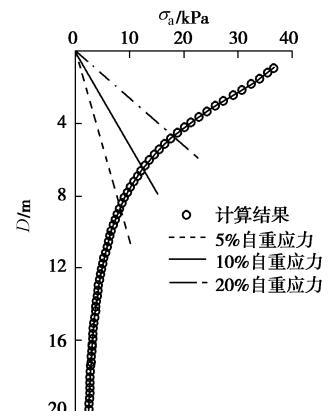


图 2 附加应力沿深度的分布

Fig. 2 Distribution of additional stress with depth

## 2.2 飞机荷载形式对工作区深度的影响

按照表 1 中提供的机型分别计算各起落架平面位置处地基附加应力随深度的变化规律, 见图 3。由于刚性道面和柔性道面结构层存在一定的差异, 并未将两种情况下的计算结果放在同一坐标内。由图 3 可知, 飞机荷载越重, 在同一深度位置处附加应力值也越大。由于柔性道面的面层模量较小, 而 A380-800 及 B747-400 这类重型飞机, 起落架构型非常复杂, 在土基顶部的叠加效应更为明显, 因此出现了附加应力随深度先增加后减少的分布规律, 但在刚性道面由于道面结构层的扩散作用更为显著, 这种“回头”现象却不明显。从该角度分析, 文献[10]中将机轮荷载按照建筑工程中条基或柱基扩散进行叠加计算的方法值得进一步商榷。

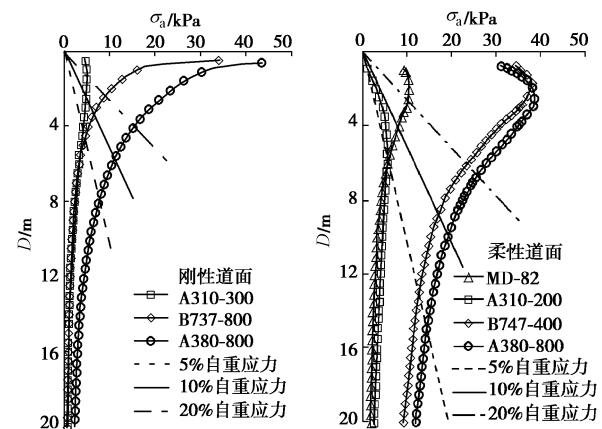


图 3 不同机型时附加应力分布

Fig. 3 Distribution of additional stress under various aircraft loads

显然, 工作区深度确定的越深, 场道在后期使用过程中出现危害飞行安全不均匀沉降的可能性越小, 但是在场道地基处理时选用处理方案的造价也会相应增加。



表 3 不同荷载类型飞机的工作区深度  
Table 3 Service depths of various aircraft load types

飞机型号	刚性道面				柔性道面		
	A310-300	B737-800	A380-800	MD-82	A310-300	B747-400	A380-800
荷载类别	轻型	中型	重型	轻型	轻型	中型	重型
5%	2.98	3.68	6.98	5.08	5.08	12.28	14.18
定义标准	10%	1.61	2.45	4.82	—	3.32	8.04
	20%	0.38	1.52	3.12	—	1.85	5.21
							5.92

图 3 中同样绘制出了自重应力某一比值沿深度的变化规律, 其与附加应力的交点即为该比值定义标准下的工作区深度。现将各机型作用下按照不同定义标准确定的工作区深度汇总于表 3。从表 3 中可以清晰地看出来, 定义比值越小, 确定的工作区深度越大, 按照 5% 的定义标准确定出的工作区深度要比 20% 确定出的工作区深度大 2 倍以上。

从表 3 中同样可以看出, 同一荷载等级的飞机、同一工作区深度标准确定的柔性道面形式工作区深度要比刚性道面工作区深度大, 这是由柔性道面的铺筑材料特性决定的。如前所述, 柔性道面由沥青混凝土材料铺筑而成, 沥青混凝土材料的刚度要小于混凝土材料的刚度, 而且柔性道面的铺筑厚度一般小于刚性道面板的厚度, 使得飞机荷载在采用柔性道面形式的场道土基中传递深度更大。

### 2.3 刚性道面厚度对工作区深度影响

作为保证道面结构强度和稳定性的主要结构层, 面层直接承受机轮荷载和外界环境因素的作用, 保护下部的其他结构层, 并且刚性道面的面层厚度也是刚性道面设计的重要内容之一。下面利用 A380-800 机型进行定量分析, 通过改变面层厚度研究其对附加应力及工作区深度的影响。计算采用的路基回弹模量为 30 MPa, 其他影响因素对工作区深度影响不大, 可在合理范围内取值即可。图 4 给出了三种不同面层厚度工况下附加应力随深度的变化规律。

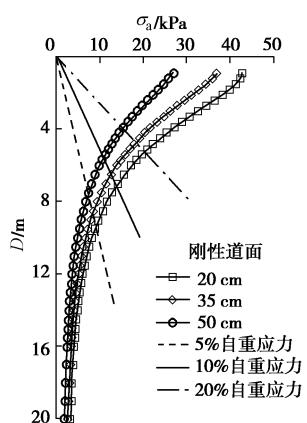


图 4 不同面层厚度时的附加应力分布

Fig. 4 Distribution of additional stress under various slab thicknesses

由图 4 可知, 面层厚度越大, 同一深度位置处的附加应力值越小, 这是由于面层厚度越大, 面层本身分担的顶部机轮荷载越大, 传递至底部土基的应力相应越小。图 5 给出了按照不同工作区深度定义标准确定的工作区深度  $D_s$  随面层厚度  $H_s$  的变化规律。从图 5 中可以看出, 工作区深度随面层厚度成线性递减的关系,

$$D_s = AH_s + B \quad , \quad (2)$$

式中  $D_s$  为工作区深度 (m);  $H_s$  为道面板厚度, m;  $A$ 、 $B$  为与定义标准有关的参数, 可由公式 (3) 和 (4) 计算确定,  $A$ 、 $B$  与定义标准  $\eta$  之间的关系如图 6 中所示。

$$A = 11.2 \times 10^{-2} \eta - 7.62 \quad , \quad (3)$$

$$B = -28.4 \times 10^{-2} \eta + 11.12 \quad . \quad (4)$$

一旦工作区深度定义标准  $\eta$  和面层厚度  $H_s$  确定, 即可根据公式 (2) ~ (4) 计算相应的工作区深度。

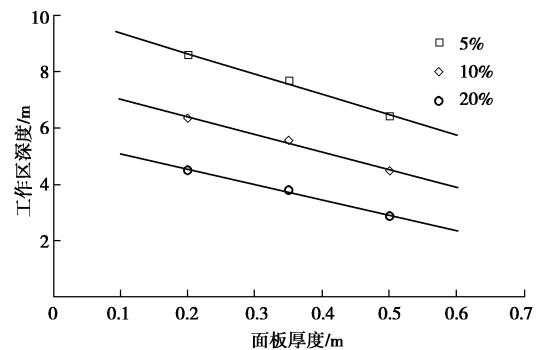


图 5 工作区深度随面板厚度的变化关系

Fig. 5 Variation of service depth with slab thickness

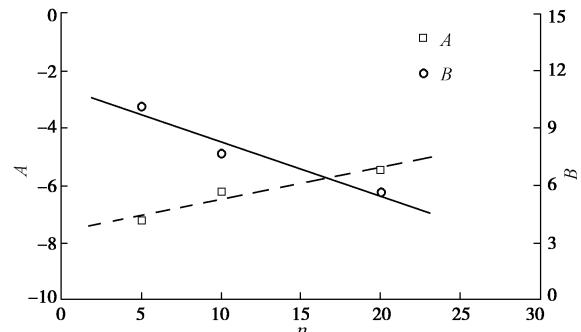


图 6 参数 A、B 随定义标准  $\eta$  的变化规律

Fig. 6 Relations between parameter  $A$  and  $B$  with definition standards  $\eta$

## 2.4 刚性道面路基回弹模量对工作区深度影响

路基回弹模量表征了地基土抵抗变形的能力, 回弹模量越大, 单位竖向荷载作用下产生的变形越小。场道路基回弹模量较为常见的取值范围为 18~80 MPa。本文以 A380-800 机型, 0.35 m 面层厚度为例, 研究不同回弹模量的场道路基中附加应力的分布规律及工作区深度的变化特征, 见图 7。

图 7 中可以看出土基模量越大, 同一深度处的附加应力值相应越大, 另外, 当深度超过 12 m 以后, 不同土基模量计算出的附加应力值基本保持不变。按照分析道面板厚度影响的方法对不同路基回弹模量的工作区深度进行分析, 见图 8。从图 8 中可以看出工作区深度  $D_s$  与地基回弹模量  $E_s$  也存在良好的线性关系, 并可以表示为

$$D_s = CE_s + D \quad (5)$$

式中  $D_s$  为工作区深度 (m);  $E_s$  为土基回弹模量 (MPa);  $C$ 、 $D$  为与定义标准  $\eta$  有关的参数,  $C$ 、 $D$  与  $\eta$  的关系如图 9 所示 ( $C$  的单位为  $10^{-3}$ ), 且可表示为

$$C = -0.42\eta + 20.73 \quad (6)$$

$$D = -0.23\eta + 7.56 \quad (7)$$

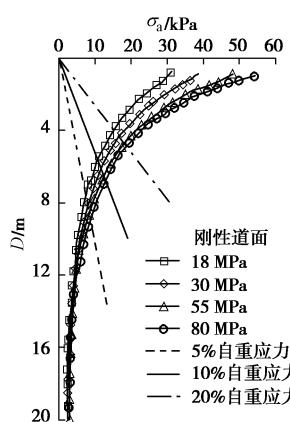


图 7 不同土基回弹模量时的附加应力分布

Fig. 7 Distribution of additional stress under various subsoil

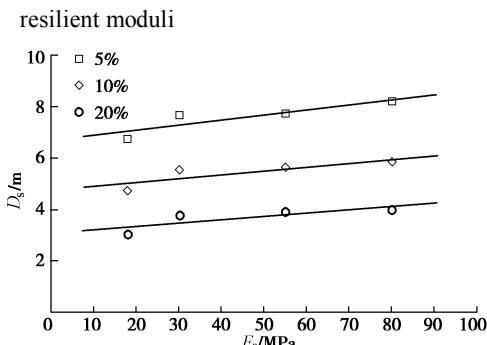


图 8 工作区深度随土基回弹模量的变化关系

Fig. 8 Variation of service depth with subsoil resilient modulus

## 3 确定工作区深度区间的简易方法

根据上述讨论以及相关的研究成果分析可以看

出, 对工作区深度影响比较显著的因素主要包括飞机荷载的形式、刚性道面面层厚度和路基回弹模量。虽然飞机荷载形式可以定性地分为轻型、中型和重型, 但实际上民用客机的轮压相差并不大。例如 A380 的起飞重量比轻型飞机高出一个量级, 但分担荷载的轮胎数量也相应更多。这就说明除了飞机荷载的大小之外, 飞机起落架构型也是影响土基附加应力分布以及工作区深度的关键因素。因此, 飞机荷载形式的影响更多地体现在起落架构型产生的叠加效果上, 但遗憾的是这种叠加效果很难定量地描述。尽管如此, 仍可达成以下共识: 飞机荷载越重, 其起落架构型也越复杂, 相应的工作区深度也越大。在实际工程中, 我们可以选择目前最重的 A380-800 飞机作为代表机型进行考虑, 如果机场跑道允许起降飞机的荷载量级并未超过该机型, 只需根据前述的代表机型进行适当折减即可。

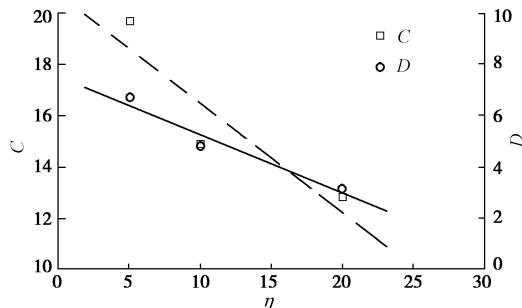


图 9 参数  $C$ 、 $D$  随定义标准  $\eta$  的变化规律

Fig. 9 Relations between parameter  $C$  and  $D$  with definition standards  $\eta$

公式 (2) 和 (5) 分别给出了工作区深度  $D_s$  与面层厚度  $H_s$  和土基回弹模量  $E_s$  之间的关系, 在实际应用中, 当面层厚度  $H_s$ , 土基回弹模量  $E_s$  和工作区定义标准确定后, 即可采用上述公式综合分析确定该工况下的工作区深度。

下面结合某一算例进行必要说明。

某机场场道混凝土道面面层厚度  $H_s=40$  cm, 土基回弹模量  $E_s=40$  MPa, 若选择附加应力减小至自重应力的 15% 作为定义标准, 在起降 A380 飞机时土基的工作区深度确定方法如下。

(1) 计算路基回弹模量为 30 MPa 时的工作区深度  $D_s^{(1)}$ 。按照定义标准 15% 代入公式 (3) 和 (4), 并计算出  $E_s=30$  MPa、 $H_s=0.4$  m 的  $D_s^{(1)}=4.49$  m。

(2) 计算面层厚度为 0.35 m 时的工作区深度  $D_s^{(2)}$ 。按照公式 (5)~(7) 计算  $H_s=0.35$  m、 $E_s=40$  MPa 的  $D_s^{(2)}=4.68$  m。

(3) 综合分析目标工况下的工作区深度。路基回弹模量越大, 工作区深度越大, 土基回弹模量为 40 MPa 的工作区深度必定大于  $D_s^{(1)}=4.49$  m; 面层厚度越

大, 工作区深度越小,  $H_s=0.4$  m 的工作区深度必然小于  $D_s^{(2)}=4.68$  m; 综上可知该工况下的工作区深度  $4.49$  m  $< D_s < 4.68$  m, 可取中值  $4.6$  m。

如果机场场道允许起降飞机的起飞重量并未超过 A380 的重量, 可以根据文中 2.2 节的结果综合分析。由于上述因素对于沥青混凝土道面下路基工作区深度影响并不显著<sup>[4]</sup>, 在进行沥青混凝土道面工作区深度道面的判定时应着重考虑飞机荷载类型的影响。

## 4 结 论

本文借助有限元分析方法求解了飞机荷载作用附加应力在场道土基分布这一边值问题, 在该基础上定量地研究了飞机荷载类型、刚性道面厚度、土基回弹模量以及不同的定义标准对工作区深度的影响, 给出了一种确定刚性道面工作区深度的简易方法, 并得出以下重要结论:

(1) 飞机荷载越重、起落架形式越复杂, 土基中附加应力的影响范围越大, 计算出的工作区深度越大; 刚性道面的厚度越大, 工作区深度越小; 土基回弹模量越大, 工作区深度越大。

(2) 刚性道面的工作区深度与刚性道面厚度、土基回弹模量之间存在良好的线性关系, 可以用文中式 (2) ~ (7) 表示, 并且这种线性关系与工作区深度的定义标准有关。

(3) 提出的简易方法可以快速方便地确定飞机荷载作用下刚性道面工作区深度, 避免了繁琐的数值分析过程。

(4) 考虑到现阶段尚无法实现不干扰机场正常运营前提下对场道土基中应力分布进行实测, 相关的模型试验研究将是后续工作的方向和重心。

在实际场道的设计和建设过程中, 可以借鉴本文的研究成果确定机场场道路基的工作区深度并选取合适的路基处理深度和处理方法, 以期取得更优的经济效益。

## 参考文献:

- [1] 冷培义, 翁兴中, 蔡良才. 机场道面设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (LENG Pei-yi, WENG Xing-zhong, CAI Liang-cai. Design of airport runway[M]. Beijing: China Communication Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 尤润华, 凌建明. 飞机荷载作用下场道地基附加应力特征[J]. 同济大学学报, 2001, 29(3): 288 ~ 293. (GUO Run-hua, LING Jian-ming. Additional stresses of pavement subgrade resulted from aircraft loads[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(3): 288 ~ 293. (in Chinese))
- [3] 程国勇, 杨召焕. 机场刚性道面地基的工作区深度研究[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(2): 51 ~ 56. (CHENG Guo-yong, YANG Zhao-huan. Study of service depth of airport rigid pavement subgrade[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013, 31(2): 51 ~ 56. (in Chinese))
- [4] 杨召焕, 程国勇. 机场柔性道面地基工作区深度研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(10): 11 ~ 17. (YANG Zhao-huan, CHENG Guo-yong. Study on service of airport flexible pavement subgrade[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(10): 11 ~ 17. (in Chinese))
- [5] 张磊, 高玉峰, 王军. 飞机荷载作用下温州机场超固结软黏土地基变形研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 59 ~ 68. (ZHANG Lei, GAO Yu-feng, WANG Jun. Study of deformations of Wenzhou airport over-consolidated soft clay foundation under cyclic aircraft loading[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural science), 2013, 35(3): 59 ~ 68. (in Chinese))
- [6] 郭通, 邓荣贵. 大型飞机荷载作用下站坪结构对地基土附加应力的影响分析[J]. 路基工程, 2014(1): 95 ~ 99. (GUO Tong, DENG Rong-gui. Analysis on influence of apron structure on additional stress in foundation soil under action of large aircraft loads[J]. Subgrade Engineering, 2014(1): 95 ~ 99. (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 Xian-min, XUE Hua-xin, DONG Qian, 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] MH/T5004 2010 民用机场水泥混凝土道面设计规范[S]. (MH/T5004 2010 Specifications for airport cement concrete pavement design[S]. (in Chinese))
- [9] 吕耀志, 董倩, 胡春飞. 跑道动荷载与国际平整度指数关系研究[J]. 中外公路, 2013, 33(3): 74 ~ 77. (LÜ Yao-zhi, DONG Qian, HU Chun-fei. A study on the change law between dynamic load of pavement and IRI[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2013, 33(3): 74 ~ 77. (in Chinese))
- [10] 庞小滢, 王睿. 云南某机场联络道扩建工程道面地基工后沉降计算[J]. 地质灾害与环境保护, 2013, 24(3): 99 ~ 103. (PANG Xiao-ying, WANG Rui. Calculating the settlement of pavement foundation at an airport in Yunnan[J]. Journal of Geological Hazards and Environmental Preservation, 2013, 24(3): 99 ~ 103. (in Chinese))

(责任编辑 明经平)