

基顶支撑不均匀度对道面板厚度影响分析

赵方冉, 李正凯, 黄信*

(中国民航大学 机场工程科研基地, 天津市 300300)

摘要:为研究土基基顶反应模量不均匀性对机场跑道结构力学性能的影响规律,针对基顶反应模量分布不均匀度及交通荷载耦合作用对混凝土道面板的受力进行有限元分析,分析相同轮载下为保证刚性道面板受力安全时基顶支撑不均匀度对混凝土道面板厚度的影响,探讨不同机型轮载对应不同道面板厚度情况下的基顶支撑不均匀度控制的临界参数。分析结果表明:混凝土板弯拉应力随着基顶支撑不均匀度的增加而增大,其影响随飞机轮载不同而存在差异,为避免道面产生严重损伤,需要增大道面板厚度。对于需要运行 A320 飞机的跑道,当道面铺设厚度为 0.36、0.38 和 0.40 m 时,基顶支撑不均匀度最大值分别不宜超过 38%、57.5% 和 70%。对于拟运行 B737-800 飞机的跑道,当板厚为 0.36 m 时板的弯拉应力超过限值而发生弯拉破坏;道面铺设厚度分别为 0.38、0.40 m 时,为保证道面板受力安全的基顶支撑不均匀度最大值分别不宜超过 33% 和 62%。

关键词:机场道面板厚度; 飞机荷载; 基顶反应模量; 基顶支撑不均匀度

1 引言

机场道面结构是飞机起降与滑行的重要受力结构^[1],为确保机场道面结构的受力安全,国内外学者对飞机荷载作用下机场道面结构的受力性能展开了系统的研究工作。周正峰等^[2]对在飞机荷载作用下 Winkler 土基上四边自由的单块板应力和变形展开了分析,研究了道面结构在多轮荷载作用下的力学响应;涂慕溪等^[3]通过数值模拟方法建立了“路基—路堤—路面”协同作用的力学模型,分析了路堤填料、车辆荷载、填筑高度以及填料模量对路面结构的影响规律;凌道盛等^[4]采用沿混凝土跑道横向傅里叶变换的方法,提出了适用于非均匀土基动力响应分析的半解析有限单元法;蔡靖等^[5]建立了机场刚性道面模型,提出了不同参数对道面位移的影响关系,并揭示了应力与位移的最不利位置;张献民等^[6]建立了机场道面三维有限元模型,分析了不同飞机起落架构型对跑道全宽度位移、应变、板底拉应力以及土基响应深度的影响;程国勇等^[7]考虑不同机场道面结构类型,分析了多种起落架构型

在临界荷位处最大弯矩与板边弯矩的关系;聂敏^[8]研究了特重交通荷载对道面结构的影响及最不利荷载位置,提出了在特重交通荷载作用下道面板的合理厚度;彭久东等^[9]采用 Winkler 土基建立了不等平面尺寸双层板模型,分析了层间接触条件、基层超宽、接缝弯沉传荷效率以及应力折减系数对道面结构的影响;Yong-Kang Fu 等^[10]基于全尺寸融雪试验平台并采用数值方法,研究了融雪机场的刚性道面在移动荷载作用下的动力响应;阳栋等^[13]采用高精度单元有限元模型对 A380 轮载作用下机场刚性道面的临界响应展开分析;刘春华^[14]通过实测级配碎石基层顶面反应模量,计算了基层不均匀支撑对刚性路面受力情况和位移情况的影响规律;邱伟等^[15]通过聚苯乙烯泡沫置换路堤填土的方法对软土土基因上覆荷载过大造成的路基变形问题进行了优化。上述分析中考虑了起落架构型、大型飞机荷载、道面接缝、移动荷载等因素,开展了道面结构力学响应的研究工作。

然而,目前分析仅考虑道面土基的竖向不均匀分布,忽略土基在水平向的不均匀分布特性。由于土基填方压实不均匀及长期环境荷载作用,实际机场道面

收稿日期:2021-11-03(修改稿)

基金项目:天津市教委科研计划自然科学基金项目(编号:2019KJ123);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:31220184014);中国民航机场工程科研基地开放基金项目(编号:JCGC2019KFJJ004)

作者简介:赵方冉,男,教授, E-mail: frzhao@cauc.edu.cn

* 通信作者:黄信,男,博士,副教授, E-mail: huangxin1395602@163.com

土基在水平向存在不均匀分布。为确保机场道面结构受力安全,应研究土基支撑不均匀度对混凝土道面板弯拉应力及厚度的影响,从而为中国机场长寿命道面结构设计提供依据。

该文建立飞机荷载—道面结构—不均匀土基相互作用的刚性道面有限元模型,考虑基顶支撑不均匀度、飞机轮载类型、刚性道面板厚度等因素,分析飞机荷载作用下土基支撑不均匀度对机场混凝土道面板的弯拉应力和厚度的影响。

2 非均匀土基机场道面结构分析方法

2.1 道面板弯拉应力及限值

道面结构弯拉应力由温度荷载与飞机荷载共同作用产生,当道面板弯拉应力小于材料极限弯拉应力则道面板受力安全^[16]。道面结构极限弯拉强度公式为:

$$\gamma_r(\sigma_{pr}+\sigma_{tqr}))\leqslant f_r$$

(1)

式中: γ_r 为可靠度系数,取 1.20; σ_{pr} 为荷载疲劳应力; σ_{tqr} 为温度疲劳应力; f_r 为极限弯拉应力,取 5.0 MPa。

其中,在计算机场刚性道面板温度疲劳应力时,需

要确定机场所处地区的自然区划,并对不同板厚情况下的温度梯度进行修正。该文基于公路自然区划Ⅱ区条件下,修正得到不同板厚的温度梯度如表 1 所示。

表 1 不同板厚对应的温度梯度

板厚/m	最大温度梯度/(℃·m ⁻¹)
0.36	58.96
0.38	55.44
0.40	51.92

2.2 道面与土基特性及数值模型

基于弹性层状理论,采用 Abaqus 有限元软件建立飞机荷载—道面结构—不均匀土基三维道面结构数值分析模型,其中土基采用 Winkler 土基模型进行模拟^[6-7]。

刚性道面平面尺寸为 5 m×5 m,基层、垫层与土基的平面尺寸为 10 m×10 m,道面结构各层为弹性材料。为考虑土基水平不均匀分布,基顶反应模量取值为 10、20、40、60、70 MPa,道面结构分层及其材料特性参数如表 2 所示。

表 2 道面结构分层及其材料特性参数

水泥混凝土面层				水泥稳定碎石基层			天然砂垫层			土基
弯拉弹性模量/MPa	泊松比	厚度/m	密度/(g·cm ⁻³)	回弹模量/MPa	泊松比	厚度/m	回弹模量/MPa	泊松比	厚度/m	基顶反应模量/MPa
36 000	0.15	0.36、0.38、0.40	2.4	1 500	0.25	0.2	200	0.3	0.3	10、20、40、60、70

飞机荷载—道面结构—不均匀土基三维道面结构模型如图 1 所示,道面结构单元采用 C3D20R 单元,面层与基层之间利用 Abaqus 中的 Tie 连接模拟接触关系,各节点具有相同的自由度;在基层四周沿 X 和 Y 方向进行约束,图中 X 为飞机前进方向,Y 为道面宽度方向,Z 为道面深度方向;在混凝土板两端截面处(即垂直于飞机行驶方向)对水平位移进行约束。

2.3 飞机轮载形式及作用位置

飞机荷载类型选择 A320 与 B737—800 两种不同机型主起落架的机轮轮载。为便于刚性道面板模型的结构化网格划分以及保证模型的计算精度,采用等效面积方法将飞机轮载与混凝土道面板的接触形式转化为正方形荷载^[6,11],飞机轮载尺寸及荷载取值参数如表 3 所示。

考虑多轮荷载作用在道面板不同位置时,道面结

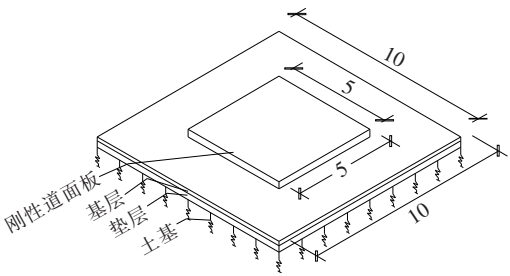


图 1 道面结构三维有限元数值分析模型(单位:m)

表 3 飞机轮载尺寸及荷载取值

机型 (起落架构型)	胎压/ MPa	轮印面积/ m ²	轮印长度/ m
A320	1.14	0.16	0.40
B737—800	1.47	0.13	0.36

构最大应力的临界荷载位置位于板缝边缘的中

部^[5,7-8],所以在该文分析中只考虑飞机轮载作用于板缝中部的情况。

2.4 土基水平基顶反应模量分布

为模拟实际土基水平不均匀分布的离散性,分析中考虑了不均匀土基分布范围、基顶反应模量变化及飞机荷载相对于土基作用位置等因素。模型中将道面结构下方的土基划分成 2×2 形式的不均匀土基,如图 2 所示,图中 A、B、C 和 D 分别表示不同基顶反应模量的土基区域范围,其中 Y₁ 和 Y₂ 表示不同土基在 Y 向分布尺寸,X₁ 和 X₂ 表示不同土基在 X 向分布尺寸。通过调整 A~D 范围内土基的基顶反应模量以考虑地基非均匀分布,该文土基水平不均匀分布的基顶反应模量取值及范围如表 4 所示。

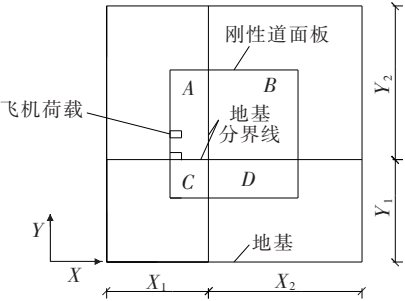


图 2 机场道面基顶反应模量水平向不均匀分布示意

表 4 飞机荷载作用时土基水平分布情况

工况		Y ₁ : Y ₂	X ₁ : X ₂	基顶反应模量/MPa
1	I	1 : 4	1 : 4	A=D=70、B=C=10~70
	II	1 : 4	1 : 4	A=D=10~70、B=C=70
2	I	2 : 3	2 : 3	A=D=70、B=C=10~70
	II	2 : 3	2 : 3	A=D=10~70、B=C=70
3	I	2 : 3	1 : 4	A=D=70、B=C=10~70
	II	2 : 3	1 : 4	A=D=10~70、B=C=70

3 基顶支撑不均匀度对道面厚度的影响

为考虑不均匀土基不同区域基顶反应模量变化对刚性道面板产生的影响,分析中引入基顶支撑不均匀度 β 表示土基水平向不均匀分布的差异程度,如式(2)所示,道面板厚度分别取 0.36、0.38 和 0.40 m。

$$\beta = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}} \tag{2}$$

式中:β 为基顶支撑不均匀度,β=0 时代表均匀土基;E_{max}、E_{min} 分别为不均匀土基中基顶反应模量较大值、

较小值。

为研究飞机荷载作用下土基水平向不均匀分布对机场道面板厚的影响,建立飞机荷载作用下道面板的弯拉应力和土基支撑不均匀度及板厚的规律模型,分析土基支撑不均匀度对道面厚度的影响,荷载形式主要采用 A320 和 B737-800 两种飞机荷载。

3.1 A320 飞机荷载

通过 A320 飞机主起落架荷载,对道面结构在 A320 荷载作用下受力情况展开分析,得到不同工况下飞机轮载作用下道面板弯拉应力如表 5 所示,其中每个工况的弯拉应力取 I 组与 II 组中弯拉应力较高的一组数据。

表 5 A320 荷载下道面板最大弯拉应力

工况	板厚 h/m	不同基顶支撑不均匀度 β(%)时的 最大弯拉应力/MPa				
		0.00	14.29	42.86	71.43	85.71
1	0.36	4.51	4.52	4.53	4.54	4.56
	0.38	4.12	4.13	4.14	4.15	4.16
	0.40	3.60	3.61	3.62	3.63	3.64
	0.36	4.65	4.65	4.68	4.78	5.10
2	0.38	4.25	4.26	4.29	4.41	4.75
	0.40	3.80	3.81	3.87	4.04	4.39
	0.36	4.47	4.51	5.18	5.88	6.93
	0.38	4.25	4.29	4.49	5.49	6.46
3	0.40	3.8	3.84	4.1	5.06	5.96

由表 5 可知:① 道面板弯拉应力随着基顶支撑不均匀度的增大而增加,如工况 3 中道面板厚为 0.36 m 且 β 为 14.29%时,道面板弯拉应力为 4.51 MPa;当 β 为 85.7%时,道面板弯拉应力为 6.93 MPa,此时道面板弯拉应力增幅为 34.9%,表明土基水平分布不均匀性越大,对道面板受力越不利;② 通过增加道面板板厚能够有效地提升道面板受力安全时基顶支撑不均匀度的取值范围,当道面板板厚为 0.36 m 且 β 小于 38%时,道面板弯拉应力小于材料极限弯拉应力,此时道面板受力安全,而当道面板板厚为 0.40 m 且 β 小于 70%时道面板受力安全。

为保证在 A320 飞机荷载作用下所铺设的道面板受力安全,在道面板厚度分别为 0.36、0.38 与 0.40 m 时,土基支撑不均匀度 β 的取值分别不宜大于 38%、57.5%与 70%,所以在道面结构设计中应考虑土基基顶支撑不均匀度对道面铺设厚度的影响。

3.2 B737—800 飞机荷载

B737—800 飞机轮载下土基支撑不均匀度对道面结构弯拉应力及厚度的影响,计算结果见表 6。

表 6 B737—800 荷载下不同工况最大道面板弯拉应力

工况	板厚 h/m	不同基顶支撑不均匀度 β (%)时的 最大道面板弯拉应力/MPa				
		0.00	14.29	42.86	71.43	85.71
1	0.36	5.13	5.15	5.19	5.25	5.29
	0.38	4.70	4.71	4.75	4.81	4.85
	0.40	4.14	4.16	4.19	4.24	4.28
2	0.36	5.13	5.16	5.42	5.85	6.21
	0.38	4.70	4.74	4.87	5.09	5.27
	0.40	4.21	4.26	4.38	4.59	4.77
3	0.36	5.13	5.24	5.56	6.22	6.87
	0.38	4.70	4.80	5.10	5.71	6.30
	0.40	4.21	4.31	4.61	5.18	5.72

由表 6 可知:① 相对于均匀土基而言,当考虑土基水平向不均匀分布时,道面板弯拉应力增加,如工况 3 中,当板厚为 0.38 m 且 β 从 0%增长至 85.71%时,道面板弯拉应力增加了 1.6 MPa,增幅为 34%;② 相对 A320 飞机作用而言,在 B737—800 飞机荷载作用下,保证道面板受力安全的临界基顶支撑不均匀度降低,如工况 3 中,当混凝土道面板铺设厚度为 0.38 m 时,为确保道面板弯拉应力小于材料极限弯拉应力,A320 飞机荷载作用下 β 应小于 57.5%,而对 B737—800 荷载 β 应小于 33%,说明分析非均匀土基支撑的道面结构时应考虑机型轮载差异的影响;③ B737—800 飞机荷载作用时,随着道面板厚度的增加,基顶支撑不均匀度允许取值范围增大,如道面板铺设厚度分别取 0.38、0.40 m 时, β 的取值分别不宜大于 33%与 62%,表明采用 0.40 m 板厚相对于 0.38 m 板厚而言,土基支撑不均匀度 β 取值允许范围可增加 29%;另外,对于运行 B737—800 飞机的道面,当板厚为 0.36 m 时,板的弯拉应力超过材料的极限弯拉应力。

综上所述,随着土基支撑不均匀度的增加,其对道面结构受力安全越不利,在道面结构设计厚度取值中应考虑土基支撑不均匀度的影响。

4 结论

建立飞机荷载—道面结构—不均匀土基相互作用

的三维数值分析模型,分析土基支撑不均匀度对机场混凝土道面板弯拉应力及道面板厚度的影响。得出如下结论:

- (1) 相对均匀土基而言,当考虑土基水平非均匀分布时,道面结构弯拉应力增大,如对 B737—800 飞机荷载的工况 3,板厚 0.38 m 且基顶支撑不均匀度从 0%增加至 85.71%时,道面板弯拉应力增加了 1.60 MPa,增幅为 34%。
- (2) 道面板弯拉应力随着基顶支撑不均匀度的增大而增加,如 A320 飞机荷载下工况 3 中道面板厚为 0.36 m 且基顶支撑不均匀度由 14.29% 增加至 85.7%时,道面板弯拉应力由 4.51 MPa 增大至 6.93 MPa,增幅为 34.9%。
- (3) 通过增加道面板板厚能够有效地提升道面板受力安全时基顶支撑不均匀度的取值范围,如 A320 飞机荷载的工况 3,道面板板厚由 0.36 m 增加至 0.4 m 时为使道面板弯拉应力小于材料极限弯拉应力,基顶支撑不均匀度限制可由 38%增大至 70%。
- (4) 相对 A320 飞机作用,B737—800 飞机荷载作用下,保证道面板受力安全的临界基顶支撑不均匀度降低,如道面板厚度为 0.38 m 时,A320 和 B737—800 飞机荷载下的基顶支撑不均匀度分别不宜大于 57.5%和 33%,说明针对非均匀土基支撑的道面结构分析中应考虑机轮胎压与起落架构型差异的影响。
- (5) 为保证道面板结构受力安全,当 A320 飞机作用下道面板厚分别为 0.36、0.38 和 0.40 m 时,基顶支撑不均匀度分别不应高于 38%、57.5%和 70%;当 B737—800 作用下道面板厚为 0.36 m 时道面板弯拉应力超过材料极限弯拉应力,当道面板厚为 0.38、0.40 m 时,基顶支撑不均匀度取值分别不应高于 33%与 62%。

参考文献:

[1] 翁兴中. 机场道面设计[M]. 北京:人民交通出版社,2017.

[2] 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.

[3] 涂慕溪,陈礼彪,曾俊铨,等. 基于有限元的土基—路堤—路面协同变形机理分析[J]. 公路交通科技,2019,36(11):33—39,74.

[4] 凌道盛,张凡,赵云,等. 飞机荷载作用下非均匀道基动力响应分析[J]. 土木工程学报,2017,50(2):97—109.

[5] 蔡靖,岳宗保,都志强. 大飞机荷载作用下机场刚性道面力学响应分析及试验研究[J]. 公路交通科技,2016,33(5):14—20.