

脱空尺寸对机场刚性道面的影响及其使用寿命分析

戴轩¹, 蔡靖¹, 李香香¹, 于祺²

(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津市 300300; 2. 天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津市 300308)

摘要:针对机场刚性道面脱空引发的病害问题,建立考虑道面结构、接缝、土基、脱空体的有限差分数值分析模型,研究不同飞机荷载作用位置以及不同接缝传荷效率条件下,脱空尺寸对于道面的影响规律;对比中国及国外规范分析脱空对道面使用寿命的影响。结果表明:脱空引发的机场道面结构弯沉受机轮荷载的时空影响较为明显,当飞机位于道面的不同位置时,脱空将诱发不同的位移模式。脱空区域上部机轮荷载引发的道面弯拉应力可达非脱空区域的2倍。飞机起落架多轮荷载与道面脱空共同作用可使得道面应力明显增加,从而导致严重的脱空破坏。提升接缝传荷能力对提升道面抵抗脱空产生的影响具有积极作用,道面的初始脱空对其使用寿命的影响最为明显。机场道面结构疲劳破坏除与面层混凝土有关,还受基层、土基、道面结构状况指数的影响,如仅考虑混凝土结构的疲劳破坏,可能高估机场道面的使用寿命。病害治理时,除对脱空区域进行处理外,还应该注意对接缝传荷能力进行评估与增强,以提升机场道面的整体性能。

关键词:机场道面; 脱空; 弯沉; 接缝传荷能力; 病害

中图分类号: U416 **文献标志码:** A

机场是航空运输的重要载体,然而机场跑道作为飞行器起降的主要通道,其病害问题已成为威胁飞行安全的重要因素之一。中国水泥混凝土道面的设计使用年限为30年,通常情况下,其在使用15~20年,甚至3~4年便出现了各种不易修复的结构破坏,甚至跑道出现陷坑。上述病害的发生多与跑道脱空有关^[1]。

针对机场跑道脱空问题,很多学者采用不同的简化方法开展理论研究,如王显祎等^[2]将机场道面分割成单独的弹性地基梁进行理论推导,得出了脱空条件下的道面板板中及板角弯沉值;张罗利等^[3]依据弹性点理论进行分析,指出当测量的板边弯沉值大于控制值时,板底局部脱空已经发生。然而上述研究采用的简化方法与道面的实际工作状态有一定差异,也无法考虑不同道面脱空形状的影响。

近年来,学者采用有限元数值模拟与室内试验的方法对道面脱空问题开展研究,谭悦等^[4]建立三维有限元数值分析模型并进行系列计算,指出可利用等效静荷载来代替飞机脉冲荷载进行分析;戚春香等^[5]指出道面脱空将影响道面板的传荷效率,脱空将导致道面传荷效率增大,且板中脱空对传荷效率影响更大;程国勇等^[6]将土基简化为温克尔地建立有限元分析模型,对重锤弯沉试验进行模拟,提出了考虑弯沉比、土体刚度等参数的脱空半径计算方法。然而上述研究大

多针对单块板,目前考虑接缝对于脱空影响的系统性研究较为缺乏;此外,将土体简化为温克尔地基无法反映土体间的相互作用,对于脱空体的几何形状也无法准确描述。

在脱空判别标准方面,黄勇等^[7]根据实测弯沉值和理论计算结果分析表明,水泥混凝土道面在板边弯沉/板中弯沉 >1.8 或板角弯沉/板中弯沉 >3.0 时可认为发生了脱空;中国MH/T 5024—2019《民用机场道面评价管理技术规范》^[8]采用弯沉比对道面脱空进行判定,当接缝传荷能力为“好”或“中”时,板边弯沉比与板角弯沉比对于脱空的判别标准分别为2.0和3.0。然而弯沉比的影响因素很多,除受到接缝传荷能力影响外,还受到道面刚度、道面厚度、土基刚度等因素的影响。另外,上述准则只能对是否脱空给出基本判断,无法对脱空的发展趋势进行进一步预测。

各种道面脱空检测方法被提出,如重锤式弯沉仪^[9]、声振法^[10]、探地雷达^[11]等。然而目前考虑不同脱空程度对于机场道面影响的评估与预测方法还较为缺乏,其根本原因在于考虑不同接缝传荷能力与脱空尺寸变化的道面脱空发展规律尚未被揭示。道面病害发生后,采用板底注浆^[12]、沥青加铺^[13]等技术可进行一定程度修复,然而在不明确脱空发展规律前提下,可能出现道面的反复脱空与病害,影响脱空病害的治理

收稿日期:2021-05-24

基金项目:天津市教委科研计划项目(编号:2020KJ021)

作者简介:戴轩,男,博士,讲师, E-mail: tianjindaixuan@126.com

效果。该文针对实际飞机荷载,利用有限差分方法建立考虑道面、接缝、基层、土基的精细化数值分析模型,分析不同接缝传荷能力、脱空位置、脱空半径等因素对于道面变形与应力的影响及发展规律,此外,通过对比中国规范与 FAA 规范中的疲劳破坏准则,分析脱空半径对道面使用寿命的影响。

1 数值分析模型的建立

采用有限差分方法进行模拟分析,基本假定如下:
(1) 道面处于弹性工作状态,基层、垫层、土基采用摩尔-库仑本构模型进行模拟。

(2) 脱空体假定为半球状,板底产生圆形脱空区^[14]。

(3) 采用梁单元(Beam 单元)对传力杆进行模拟,不考虑其出现塑性。

(4) 通过飞机不同位置的静荷载,并通过动荷载作用系数简化飞机移动荷载的作用过程。

计算荷载采用 A320 主起落架荷载参数(表 1)。根据张献民等^[15]研究成果,国际平整度指数对飞机作用在道面上的荷载有显著影响,考虑国际平整度指数取为 3 m/km 的普遍道面情况,计算得出滑跑下的动荷载系数为 1.2。根据机型重量和胎压并考虑动荷载系数,将飞机荷载简化为均布的矩形面荷载进行力学计算。

表 1 A320 飞机荷载参数

| 最大滑行重量/kN | 胎压/MPa | 轮印尺寸/(m×m) | 起落架机轮个数 | 机轮间距/m |
|-----------|--------|------------|---------|--------|
| 758.52 | 1.14 | 0.36×0.60 | 2 | 0.93 |

由于 A320 单个起落架构型为双轮,因此考虑单个起落架的两个轮胎进行加荷。根据飞机滑行时道面受荷顺序,选取两个典型位置进行分析,荷载作用位置 1 位于距板角 1 m 处(飞机尚未运动至脱空区域上方,脱空区域位于板角),荷载作用位置 2 位于板角处(飞机运动至脱空区域上方),如图 1 所示。模拟时模型的侧面约束水平位移,底面约束竖向和水平位移。

有限差分模型及网格划分如图 2(a)所示,模型尺寸为 6 m×6 m×5 m,在板角设有半球形脱空区域,模型采用六面体与四面体网格,对脱空区域网格进行加密。同时模型考虑了接缝,接缝宽度取 8 mm,在接缝处利用梁单元设置拉杆和传力杆,横向传力杆间距设为 30 cm,纵向拉杆间距设为 60 cm,接缝杆件长度

60 cm,直径为 38 mm,接缝布置如图 2(b)所示。数值模拟的道面结构和材料参数如表 2 所示。

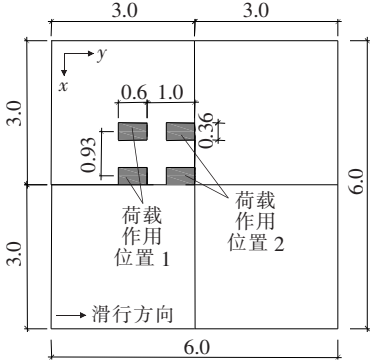
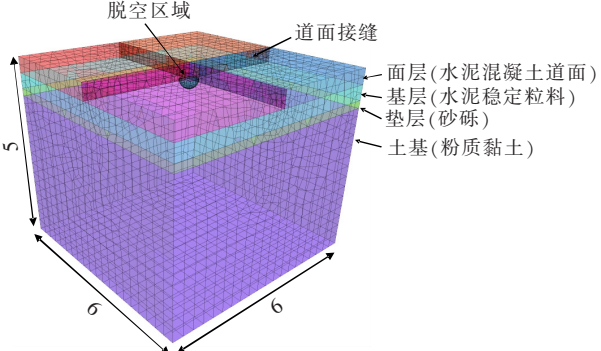
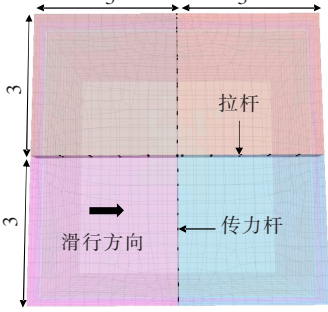


图 1 荷载作用位置(单位:m)



(a) 模型网格划分



(b) 接缝布置图

图 2 有限差分数值分析模型(单位:m)

表 2 道面结构和材料参数

| 部位 | 厚度/m | 密度/(kg·m ⁻³) | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) |
|------|-------|--------------------------|----------|------|---------|----------|
| 面层 | 0.415 | 2 460 | 37 000 | 0.15 | — | — |
| 基层 | 0.400 | 2 200 | 2 500 | 0.25 | 3 000 | 40 |
| 垫层 | 0.200 | 1 480 | 600 | 0.25 | 0.1 | 40 |
| 土基 | 4.000 | 1 800 | 60 | 0.35 | 20 | 30 |
| 接缝杆件 | — | — | 200 000 | 0.30 | — | — |

模拟步骤如下:①生成土基,地应力平衡;②依次施工垫层、基层、面层,获得初始状态应力;③采用生死单元法,将板角脱空区域单元(图2)“杀死”,形成道面脱空基本条件;④施加飞机荷载,分析脱空条件下道面结构状态。

2 脱空对道面响应的影响分析

2.1 不同脱空半径的影响

图3为不同脱空半径对于道面竖向位移的影响,图中横轴为垂直飞机滑行方向的板边对应位置(图1)。

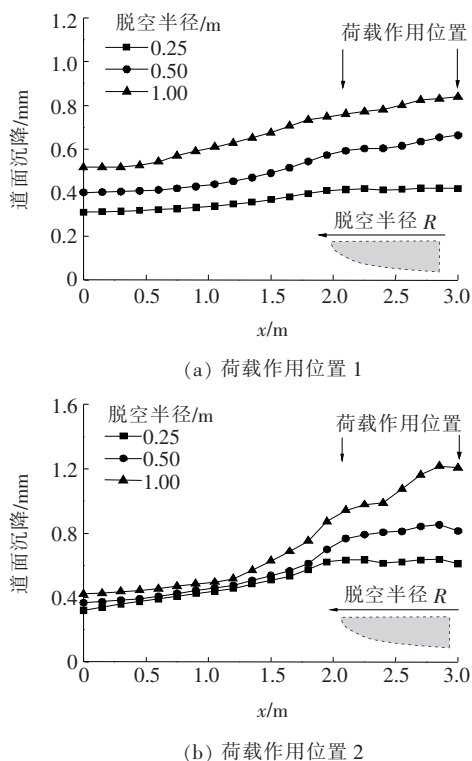


图3 不同脱空半径对道面竖向位移的影响

从图3中可以看出:

(1) 当飞机位于荷载作用位置1时,道面并未发生明显的弯沉,表现出向脱空区域的整体倾斜,这与面层刚度较大有关;随着脱空半径的增加,道面竖向位移逐步增大,且道面倾斜程度逐步增加。

(2) 当飞机位于荷载作用位置2时,机轮荷载直接作用在脱空区域上方,导致道面发生较为明显的弯沉,且弯沉主要发生在机轮荷载作用位置。随着脱空半径的增加,道面竖向弯沉逐步增大,脱空半径的影响主要集中在距板边2 m范围内;对于距离板边超过2 m位置,脱空引起的道面竖向位移变化较小。当脱空半径超过0.25 m后,脱空半径增大1倍,道面竖向位

移值增加了约43%。

(3) 对比不同荷载作用位置,当机轮荷载位于位置2时引起的道面竖向最大位移较位置1增加约50%,可见脱空引发的道面变形受机轮荷载的时空影响较为明显。当飞机位于道面的不同位置时,脱空将引发不同的位移模式,其中机轮直接作用于脱空区域上方,是道面发生明显竖向位移和结构损伤的主要诱因。当脱空半径超过0.25 m后,脱空将引发道面位移加剧恶化发展。

图4为不同脱空半径下机轮作用处的道面弯拉应力值。当机轮位于荷载作用位置1时,可以看出:机轮荷载处的道面弯拉应力出现明显峰值,这与未脱空道面受力情况相一致^[16],此外,脱空区域上方机轮引发的道面弯拉应力更大,且随脱空半径的增加,这种趋势愈发明显。

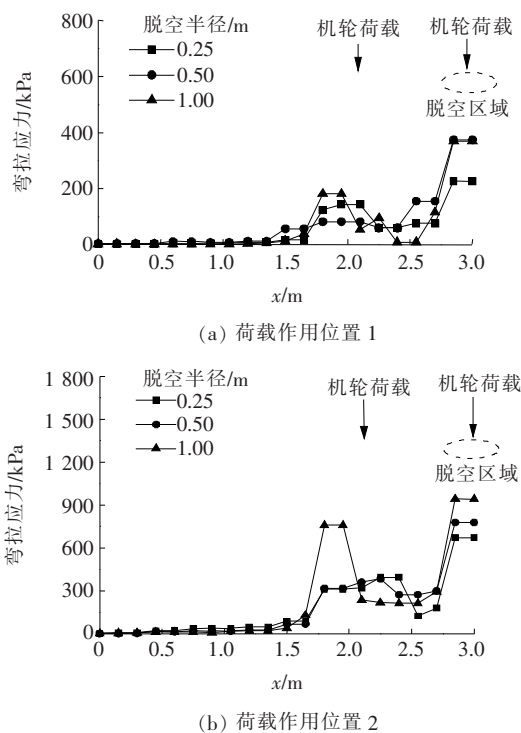


图4 不同脱空半径对道面应力的影响

2.2 道面弯沉比变化规律

黄勇等^[7]通过道面实测数据,提出在机场道面中使用板角或板边与板中弯沉之比 η 来评价道面是否出现脱空。弯沉比计算公式如下:

$$\eta = \frac{l_j}{l_z} \quad (1)$$

式中: l_z 为板中弯沉; l_j 为板角或板边弯沉。

对于图2中的模型,采用弯沉比进行分析,弯沉比模拟分析时与实际重锤式弯沉仪的作用过程一致,即

采用 20 t 重锤荷载作用在板角、板边和板中得到不同的弯沉比。计算条件下,道面弯沉比 η 随脱空半径的变化规律如图 5 所示。

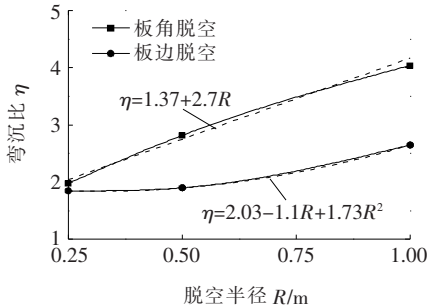


图 5 不同脱空位置道面弯沉比随脱空半径的变化

由图 5 可以看出:板角脱空时道面弯沉比与脱空半径几乎呈线性发展,随着脱空半径的增加, η 值迅速增大,图中同样列出了模拟工况下的拟合公式;对于板边脱空,其随脱空半径发展要更加缓和,当脱空半径超过 0.5 m 后才出现较快增加,可以用二次曲线进行描述。总体上,板角脱空弯沉比要大于板边脱空工况,当脱空半径为 1 m 时,板角脱空的 η 值较板边脱空增大 52%。

2.3 不同接缝传荷能力的影响

为考虑接缝传荷能力的影响,改变道面接缝的参数与设置情况进行进一步分析。定义传荷系数(C_{LET})表征接缝传荷效率^[5],如下式所示:

$$C_{LET} = \frac{S_b}{S_0} \quad (2)$$

式中: S_0 为受荷板边的沉降; S_b 为未受荷相邻板边的沉降。

模拟条件下的 $C_{LET} = 0.8$, 不考虑接缝进行计算,则可以得到 $C_{LET} = 0$ 的分析结果。不同接缝传荷能力下道面弯沉比随脱空半径的关系如图 6 所示。

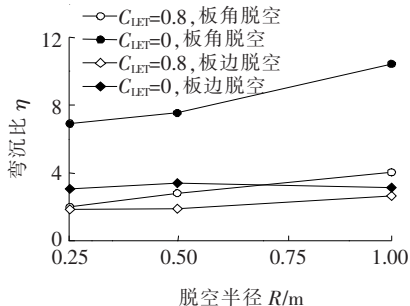


图 6 传荷能力对道面弯沉比的影响

由图 6 可知:

(1) 接缝传荷能力对于脱空引起的弯沉比有较大影响,当传荷能力为 0 时(即仅为单板受荷),无论是板角脱空还是板边脱空,引发的 η 值均比 C_{LET} 为 0.8 的工

况要大,且对于板角脱空更为明显。对于 C_{LET} 为 0 工况,板角脱空引发的道面弯沉值可为板边脱空的 2~3 倍。

(2) 随着脱空半径的增大,接缝传荷能力的影响愈发明显。当脱空半径为 1 m 时,接缝传荷能力较好时引起的 η 值较接缝传荷能力较差工况降低了 60%,说明提升接缝传荷能力对提升道面抵抗脱空引发的影响具有积极作用。在对道面进行修补时,除对脱空区域进行注浆,对道面损坏区域进行修补外,还应该注意对接缝传荷能力进行评估与增强,以降低脱空对于道面弯沉的影响。

3 脱空对道面寿命的影响分析

道面结构在飞机反复荷载作用下的疲劳破坏是影响其使用寿命的重要因素,脱空会严重影响机场道面的使用寿命,因此有必要对其进行针对性分析。飞机容许作用次数 N_e 是确定道面使用寿命的重要参数, MH/T 5004—2010《民用机场水泥混凝土道面设计规范》^[17] 采用不同飞机疲劳损耗叠加的方法确定混凝土板的厚度,根据混凝土弯拉疲劳强度计算公式利用下式计算允许作用次数:

$$N_e = 10^{(14.048 - 15.117\sigma_p/f_{cm})} \quad (3)$$

式中: σ_p 为板边弯拉应力; f_{cm} 为混凝土弯拉强度设计值,对于飞行区指标 II 为 C 级以上机场可取为 5 MPa。

式(3)的提出基于混凝土小梁疲劳试验,然而混凝土梁的疲劳与机场道面结构的疲劳问题有所不同,机场道面结构疲劳破坏除与面层混凝土有关,还与基层结构与土基情况有很大关系,道面结构破坏的判断条件可用道面结构状况指数(I_{SCI})来表征。MH/T 5024—2019《民用机场道面评价管理技术规范》^[8] 将水泥混凝土道面使用过程中的破坏分为 15 大类,包括裂缝、角隅断裂、错台、板角剥落等,并根据道面病害的不同程度对 I_{SCI} 分值进行折减(满分 100 分),当 I_{SCI} 小于 80 分时,认为道面出现了比较严重的结构性破坏,不适于飞机起降。

FAA 道面设计软件 FAARFIELD2.0 将道面的疲劳破坏与 I_{SCI} 值、土基情况等结合起来计算道面的破坏作用次数,如下式所示:

$$\lg C + \frac{1}{R_{SR} \cdot F_{cal}} = \frac{\left[\frac{F'_s b d}{(1 - \frac{I_{SCI}}{100})(d-b) + F'_s b} \right]}{\left[\frac{(1 - \frac{I_{SCI}}{100})(ad-bc) + F'_s b c}{(1 - \frac{I_{SCI}}{100})(d-b) + F'_s b} \right]} \quad (4)$$

$$R_{SR} = \sigma_p / f_{cm} \quad (5)$$

式中: R_{SR} 为应力比; F_{cal} 为应力标定系数, 可取 1.0; F'_s 为稳定基层的补偿系数; a 、 b 、 c 、 d 为与基层模量相关的补偿系数, 其取值来源于道面足尺加速加载试验 (NAPTF)^[18], 计算时 $a = 0.760$, $b = d = 0.160$, $c = 0.857$; C 为道面破坏时的覆盖作用次数。

需要说明的是, 覆盖作用次数 C 与飞机实际运行次数 P 不同, 一般认为飞机沿道面横向分布满足正态分布曲线^[19], 即对飞机运行来说, 道面上理论最大应力点被覆盖是存在一定概率的, 决定道面使用寿命的是覆盖作用次数最多的位置。可使用通行覆盖率 (P/C) 来将道面覆盖作用次数与运行次数进行转化, 对于设计机型 (A320) 计算得到通行覆盖率为 3.56。对于式 (4), 代入结构破坏时的 I_{SCI} 值 ($I_{SCI} = 80$) 与上述参数, 则可以得到考虑道面结构状况的疲劳准则如下:

$$f_{cm} / \sigma_p = 0.875 \lg \left(\frac{N_e}{3.56} \right) + 0.837 \quad (6)$$

FAA 咨询通告 AC 150/5320-6D^[20] 没有考虑结构状况指数, 采用如下方程描述道面的疲劳破坏:

$$C = \begin{cases} 5\,000 \times 10 \left(\sqrt{\frac{f_{cm}}{\sigma \times 1.3}} - 1 \right) / 0.156\,03 & (C > 5\,000) \\ 5\,000 \times 10 \left(\sqrt{\frac{f_{cm}}{\sigma \times 1.3}} - 1 \right) / 0.070\,58 & (C \leq 5\,000) \end{cases} \quad (7)$$

从上述破坏方程可以看出: 道面所受应力将直接影响其使用寿命, 当道面板底脱空使得其应力增加后, 道面使用寿命将发生不同程度的降低。针对该文分析机型 (A320) 与道面情况, 不同疲劳方程计算得到的容许作用次数与道面应力比的关系如图 7 所示, 图 7 中纵轴为对数坐标。

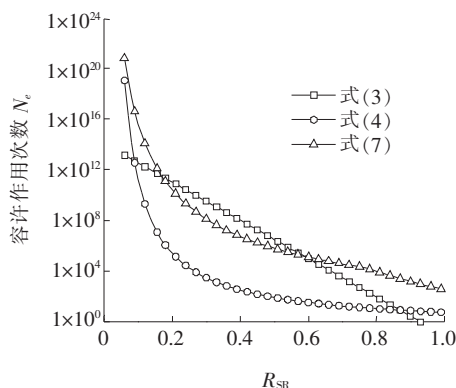


图 7 容许作用次数与应力比的关系

由图 7 可以看出: 随着应力比的增加, 道面结构的容许作用次数下降明显, 然而不同公式体现出的规律有所不同。中国规范 [式 (3)] 中当道面弯拉应力提升

时, 容许作用次数的对数值线性递减; 而对比 FAA 规范, 曲线均呈现反比例下降趋势。对于式 (7), 当道面应力比 R_{SR} 超过 0.6 以后, 其得到的允许作用次数最高 (偏于危险), 特别当 $R_{SR} = 1$ 时认为跑道仍可以承受飞机荷载, 这显然不利于道面安全。而对于式 (3)、(4), 在相同条件下, 式 (4) 在 R_{SR} 为 0.1~0.9 时得到的容许作用次数均较式 (3) 更低, 因此设计时更偏于安全。此外, 式 (4) 考虑了基层、土基、道面结构状况的综合影响, 更符合机场道面的实际使用情况。

根据不同道面脱空半径 ($R = 0.25\text{ m}$ 、 0.50 m 、 0.75 m 、 1.00 m) 计算得到的最大弯拉应力, 可以初步估计脱空对于道面使用寿命的影响。定义道面使用寿命折减幅度 λ 如下式所示:

$$\lambda = N_{ei} / N_{ei-1} \quad (8)$$

λ 为以某一脱空尺寸计算的道面使用寿命的折减幅度值 (与上一级更小的脱空计算尺寸相比)。 λ 值越小, 则表示脱空发展至该尺寸对道面寿命的影响越严重, 脱空发展也越快。图 8 为计算得到的不同脱空半径对于道面使用寿命的影响。

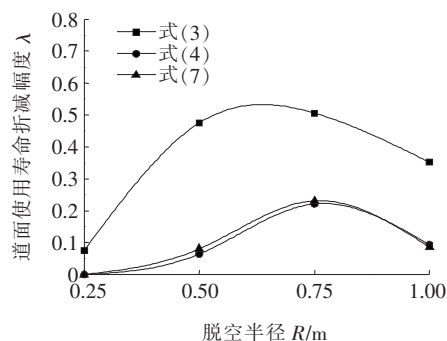


图 8 脱空半径对道面使用寿命的影响

由图 8 可以看出: λ 的变化规律基本一致, 且 FAA 提出的式 (4) 与式 (7) 得到的 λ 值大小十分接近。无论使用何种计算方法, 当道面从完好发展至脱空半径 0.25 m 时, 对道面使用寿命的影响最大, 寿命折减值可达 1×10^{-8} [式 (7)]。当脱空半径发展至 0.75 m, 折减值逐步增加, 而超过 0.75 m 后, 折减值又有所减小, 即此时脱空引发的道面寿命折减更多。总体上, 脱空半径为 0.5~1 m 时, 式 (3) (中国机场道面规范) 计算得到的道面使用寿命折减值为 0.4~0.5; 而利用 FAA 计算方法, 折减值为 0.1~0.2。从上述分析可以看出: 控制道面初始脱空对于提升场道寿命十分关键, 其影响也最大, 当脱空一旦发生, 其使用寿命将呈几何级减少; 而对于已经脱空的道面, 脱空半径每增加

0.25 m,其使用寿命最大将减少 80%~90%。

4 结 论

(1) 随着脱空半径的增加,道面竖向位移逐步增大。脱空引发的道面变形受机轮荷载的时空影响较为明显,当飞机位于道面的不同位置时,脱空将引发不同的位移模式,其中机轮直接作用于脱空区域上方是道面发生明显竖向弯沉和结构损伤的主要诱因。

(2) 脱空区域上方的机轮引发的道面弯拉应力更大,且随脱空半径的增加,这种趋势愈发明显。当脱空区域半径为 1 m 时,脱空区域上部机轮荷载引发的道面弯拉应力可达非脱空区域的 2 倍。飞机起落架多轮荷载与道面脱空可形成应力叠加,从而导致严重的脱空破坏。

(3) 对于分析工况,板角脱空时道面弯沉比与脱空半径几乎呈线性发展。对于板边脱空,弯沉比随脱空半径的发展要更加缓和,当脱空半径超过 0.5 m 后才出现较快增加。总体上,板角脱空弯沉比要大于板边脱空工况,当脱空半径为 1 m 时,板角脱空的 η 值较板边脱空增大 52%。

(4) 提升接缝传荷能力对提升道面抵抗脱空引发的影响具有积极作用。在对道面进行修补时,除对脱空区域进行注浆,对道面损坏区域进行修补外,还应该注意对接缝传荷能力进行评估与增强,以提升机场道面的整体性能。

(5) 机场道面结构疲劳破坏除与面层混凝土有关外,还与基层、土基、道面结构状况指数有很大关系,如仅考虑混凝土结构的疲劳破坏,可能高估机场道面的使用寿命。控制道面的初始脱空对于提升道面使用寿命十分关键,当脱空一旦发生,其使用寿命将呈几何级减少。

该文仅针对有限差分数值分析模型,并参考中国以及 FAA 相关规范对道面脱空引发的影响规律进行了分析。尚应考虑更多因素如道面厚度、不同土基模量、不同机型,并结合模型试验开展进一步深入研究,以便为机场道面病害治理和延长跑道寿命提供参考。

参考文献:

- [1] 国洋. 机场刚性道面板底脱空定量分析和寿命预估[D]. 西安:长安大学,2019.
- [2] 王显祎,凌建明. 水泥混凝土机场道面板角脱空判定分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007(5):612—616.
- [3] 张罗利,蔡良才. 基于惰性点理论的机场道面脱空评定方法研究[J]. 路基工程,2009(2):153—155.
- [4] 谭悦,凌建明,袁捷,等. 脱空对机场水泥混凝土道面荷载应力的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(4):552—556.
- [5] 戚春香,崔晓云,杨简. 脱空对机场道面板接缝传荷能力影响分析[J]. 科学技术与工程,2016,16(22):282—286.
- [6] 程国勇,王翠玲,郭志光. 机场道面脱空范围定量分析模型研究[J]. 公路交通科技,2014,31(9):1—5.
- [7] 黄勇,袁捷,谭悦,等. 机场水泥混凝土道面脱空判定及影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(6):861—866.
- [8] 同济大学. 民用机场道面评价管理技术规范:MH/T 5024—2019[S]. 北京:中国民航出版社,2019.
- [9] 陈忠. 探地雷达技术在检测路面内部质量中的应用研究[J]. 中外公路,2017,37(2):64—66.
- [10] 彭永恒,谭忆秋,张肖宁. 弹性地基接缝板声振法脱空判定[J]. 岩土力学,2005,28(12):1 981—1 986.
- [11] 吴秋霜,王齐仁,皮海康. 水泥混凝土路面脱空的探地雷达图像特征分析[J]. 煤田地质与勘探,2018,46(4):181—185.
- [12] 问鹏辉,王朝辉,张磊. 基于注浆模拟的道路基层碱激发材料加固效果研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(1):276—282.
- [13] 肖春发,罗卫,粟宋来,等. 水泥路面板加铺沥青面层后板底脱空检测及评价方法[J]. 中外公路,2020,40(1):52—55.
- [14] 廖方方. 基于板底脱空演化时程分析水泥路面疲劳寿命研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
- [15] 张献民,陈新春,李少波. 基于国际平整度指数 IRI 的飞机道载系数分析[J]. 南京航空航天大学学报,2016,48(1):136—142.
- [16] 王乾. 基于板底脱空的水泥混凝土路面检测、处治与力学行为研究[D]. 西安:长安大学,2009.
- [17] 中国民航机场建设集团公司. 民用机场水泥混凝土道面设计规范:MH/T 5004—2010[S]. 北京:中国民航出版社,2010.
- [18] WANG Q, DAVIS J. Airport Pavement Groove Identification and Analysis at NAPTF[J]. Advanced Materials Research,2013,723:1 003—1 010.
- [19] 吴爱红,蔡良才,顾强康,等. 适应未来大型飞机的水泥混凝土道面设计方法[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(9):1 169—1 175.
- [20] FAA. Standards for Airport Pavement Design and Evaluations, AC 150/5320—6D[R]. USA: Department of Transportation,1995.