

考虑脱空深度影响的机场刚性道面工作性能研究

戴轩^{1,2}, 李朝¹, 蔡靖^{1*}, 李岳¹, 刘国光¹, 齐麟¹

(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津市 300300; 2. 民航数字化创新山东省工程研究中心, 山东 泰安 271000)

摘要: 为了分析道面脱空深度对跑道安全的影响规律, 该文采用有限差分方法开展数值模拟研究, 考虑了不同机型、道面尺寸、脱空深度以及脱空面积等因素, 共设计了208组工况。基于考虑结构状况指数衰减的道面寿命模型, 提出评估脱空对道面使用寿命影响的分析方法。研究表明: 随着脱空深度的增加, 道面弯沉和应力逐步增加, 但增长速率越来越缓; 脱空深度与脱空面积的影响存在耦联效应, 当脱空面积较大时, 脱空深度的影响才开始显现。在道面弯沉与应力的影响云图中, 均存在非敏感区; 提出的道面弯沉速率发展指数与应力发展指数可对脱空的影响趋势进行评价, 且随着脱空面积与深度的增加, 上述指数均存在峰值区。根据不同荷载、道面结构以及起落架次, 绘制了脱空程度与剩余使用寿命影响图, 可对脱空的影响进行快速评价与分析, 从而保障场道结构安全。

关键词: 路面工程; 机场道面; 脱空; 弯沉; 使用寿命; 病害; 结构状况指数

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

Working Performance of Rigid Airfield Runway Considering Influence of Cavity Depth

DAI Xuan^{1,2}, LI Zhao¹, CAI Jing^{1*}, LI Yue¹, LIU Guoguang¹, QI Lin¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Shandong Engineering Research Center of Civil Aviation Digital Innovation, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: In order to analyze the influence of cavity depth on runway safety, a numerical simulation was carried out using the finite difference method. A total of 208 sets of different working conditions were designed by taking into account factors such as different aircraft types, runway dimensions, and cavity depth and area. Based on the runway life model considering the exponential decay of the structural condition, an analytical method was proposed to evaluate the impact of the cavity on the runway life. The results show that the bending and stress of the runway increase gradually with the increase in the cavity depth, but the growth rate is getting slower and slower. There is a coupling effect between the impact of cavity depth and cavity area, and the impact of cavity depth starts to appear when the cavity area is larger. In the cloud diagram of the influence of runway bending and stress, there is a non-sensitive area. The proposed runway bending rate development index and stress development index can be used to evaluate the influence of the trend of the cavity, and with the increase in the cavity area and depth, the above indexes have a peak area. According to different loads, runway structures, and take-off and landing times, the influence diagrams of cavity degree and remaining service life are drawn, which can quickly evaluate and analyze the influence of the cavity, thus guaranteeing the structural safety of the airfield runway.

Keywords: road engineering; airport runway; cavity; bending; service life; diseases; structural condition index

收稿日期: 2023-04-08

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(编号:21JCQNJC00850); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:3122022043)

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

*通信作者: 蔡靖, 女, 博士, 教授. E-mail: caijing75@163.com

0 引言

机场是航空运输的重要组成部分,而跑道作为航空器起降的场所,其服役安全问题已成为威胁航空运输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,但其在使用15~20年,甚至7~8年便出现不易修复的结构性损伤,板底脱空是诱发道面产生各种病害与结构性破坏的主要因素之一^[1-2]。根据脱空深度与形成原因,可将脱空分为浅层脱空与深层脱空。浅层脱空是由于道面下方的基层、垫层等材料损失引起的,往往由接缝质量不良、唧泥现象、飞机动荷载与水共同产生的泵吸作用等引发,导致基层材料从接缝中流失,形成脱空现象。而当脱空是由深层土基流失引发时,则易演化为深层脱空。深层脱空往往是由于道面下方的雨污水管、隧道下穿施工造成的松动区,或道面下埋结构(如各种管涵、地下结构)发生病害、渗漏水等问题所导致。深层脱空对道面结构性能产生较大影响,甚至可能引发结构破坏。以往学者对道面脱空的研究大多集中于浅层脱空,而对深层脱空及不同脱空深度的影响关注较少^[3]。

对于浅层脱空,学者在道面脱空评价指标、脱空判定标准、脱空的影响等方面开展了相关研究^[4]。在脱空判定标准方面,黄勇等^[5]根据实测弯沉数据和理论计算结果发现水泥混凝土道面板边脱空判定标准为板边与板中弯沉比大于1.8;板角脱空判定标准为板角与板中弯沉比大于3.0;中国《民用机场道面评价与管理技术规范》(MH/T 5024—2019)^[6]亦采用弯沉比来判别道面脱空。程国勇等^[7]通过数值模拟,分析了水泥混凝土道面板底的空隙率随板边、板中和板角与板中挠度比的变化规律,并提出了基于现有机场道面挠度试验的板底空隙范围的定量评价方法。波特兰水泥协会提出冲刷损伤模型,该模型以板角挠度作为脱空的评价指标^[8];美国国家公路研究机构提出了经验性脱空判别模型^[9]。近年来,赵鸿铎等^[10]通过简化数值模拟分析,提出了道面应力的临界脱空状态指标,发现其比传统弯沉指标更能准确地反映脱空对道面结构的影响,然而该方法基于温克尔地基梁模型模拟土基,无法反映脱空导致的地层松动对地基刚度的影响。此外,上述各种标准只能对是否脱空给出基本判断,对于道面脱空程度的发展趋势及

对道面使用寿命的影响尚缺乏定量判别方法。

关于脱空影响规律的研究主要集中于脱空面积,滕立鹏等^[11]运用统计学偏相关分析理论,分析了道面脱空率与道面寿命的相关性,并利用有限元方法分析了不同脱空程度对道面结构性能的影响;葛思彤^[12]通过有限元数值模拟,将土基简化为温克尔地基梁,研究了道面弯拉应力随脱空尺寸、板厚变化的一般规律。上述研究大多利用有限元方法,建立了基于温克尔地基的道面结构模型,但均没有考虑脱空深度的影响。同时,也缺乏在多种因素共同影响下进行系统分析。尽管各种室内模型试验被用于研究脱空的影响,但试验模拟条件与道面的实际工作状态下的情况存在较大差异^[13-15]。在道面服役阶段,目前往往采用道面状况指数或结构状况指数来评价其服役性能与病害发展情况^[6],若脱空,道面状况指数、结构状况指数将发生改变,从而影响其使用寿命。目前,对于脱空的研究,并没有将其与评价指标的衰减规律进行联系,因而难以准确评估脱空对其剩余使用寿命的影响。

本文利用有限差分方法,建立考虑了面层、基层、底基层以及土基的脱空数值分析模型,在采用理论公式对模型进行验证的基础上,设计208个数值模拟工况,研究在不同脱空深度与面积的影响下机场刚性道面工作性能,分析脱空发展对道面性能劣化速率的影响;基于考虑结构状况指数衰减的道面寿命评价模型,提出脱空对道面使用寿命影响的分析方法。

1 数值计算模型及其验证

1.1 模型建立

利用有限差分方法建立的数值分析模型如图1所示,模型平面尺寸为20 m×20 m,自上而下分别为道面、基层、底基层、土基,各层厚度如表1所示,厚度取值根据《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2010)^[16]设计得出,水泥混凝土道面为方形,边长为4~7 m。土基、基层、底基层采用Mohr-Coulomb本构模型,道面采用弹性本构模型,各层物理力学参数同样列于表1。其中,面层混凝土根据上述规范,设计弯拉强度为5 MPa,泊松比为0.15,基层材料参数根据基顶反应模量换算得出,土基物理力学参数来源于地质勘察报告。基层划分精细分析网格,以对脱空平面尺寸进行精细化控制。

机型	道面板 尺寸/ (m×m)	荷载 作用 形式	脱空面积 A/m^2						工况数
A320	4×4	形式 1	0.16	0.64	1.44	2.56	4	20	
	5×5	形式 2	0.16	0.64	1.44	2.56	4	20	
B737-800	6×6	形式 1	0.16	0.64	1.44	2.56	4	20	
	7×7	形式 2	0.16	0.64	1.44	2.56	4	20	
总计								80	

脱空深度 h 分别取 2.5 m、4.5 m、6.5 m 进行分析,共模拟工况 128 个,如表 4 所示。因篇幅所限,后文将选取典型工况下的结果进行分析。

表 4 不同脱空深度数值模拟分析工况

Table 4 Numerical simulation analysis of working condition of different cavity depths

机型	道面板尺寸/(m×m)	脱空面积/m ²	脱空深度(含浅层)与深层脱空)h/m	工况数
A320	4×4	0.16	0.5 2.5 4.5 6.5	16
	5×5	0.64	0.5 2.5 4.5 6.5	16
	6×6	1.44	0.5 2.5 4.5 6.5	16
	7×7	2.56	0.5 2.5 4.5 6.5	16
B737-800	4×4	0.16	0.5 2.5 4.5 6.5	16
	5×5	0.64	0.5 2.5 4.5 6.5	16
	6×6	1.44	0.5 2.5 4.5 6.5	16
	7×7	2.56	0.5 2.5 4.5 6.5	16
总计				128

1.2 数值分析模型的验证

机场水泥混凝土道面正常工作时,一般处于弹性状态,因此道面结构可近似等效为温克尔地基上的弹性小挠度薄板。通过 Hankel 积分变换,可以得到均布荷载作用下道面弯沉的理论解^[20],如式(1)所示:

$$w(x) = \frac{qR}{kl} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{x}{l}t\right)J_1\left(\frac{R}{l}t\right)}{1+t^4} dt \quad (1)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_c h_s^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (2)$$

式中: x 为距荷载作用中心的距离; $w(x)$ 为距板中 x 处的弯沉; q 为圆形均布荷载的压力,本研究中为机轮胎压; R 为圆形均布荷载的半径; k 为地基反应模量; l 为道面板的相对刚度半径; J_0 、 J_1 分别为第一类 0 阶、1 阶贝塞尔函数; t 为积分参数; E_c 、 h_s 、 ν 分别为道面板的弹性模量、板厚、泊松比。

不同荷载下道面结构内力的理论解^[21]如式(3)、(4)所示:

$$\begin{cases} M_r(x) = \\ \frac{Ql}{\pi R} \int_0^\infty \frac{J_1\left(\frac{R}{l}t\right)}{1+t^4} \left[\mu J_0\left(\frac{x}{l}t\right) - \frac{(1-\nu)}{x} J_1\left(\frac{x}{l}t\right) \right] t dt \\ M_\theta(x) = \\ \frac{Ql}{\pi R} \int_0^\infty \frac{J_1\left(\frac{R}{l}t\right)}{1+t^4} \left[\mu J_0\left(\frac{x}{l}t\right) - \frac{(1-\nu)l}{x} J_1\left(\frac{x}{l}t\right) \right] t dt \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma(x) = 6M_t(x)/h_s^2 \quad (4)$$

式中: $M_r(x)$ 、 $M_\theta(x)$ 、 $\sigma(x)$ 分别为距板中 x 处的径向弯矩、切向弯矩和应力; Q 为均布荷载的合力; ν 为泊松比,取 0.15。

飞机起落架一般为多轴多轮,采用上述理论难以对机型荷载进行直接验证,需进行简化。参考姚炳卿等^[22]、胡洪龙等^[23]的研究成果,本文采用荷载等效原则,将多轮荷载等效为同等胎压作用下的等效单轮荷载。针对 A320 及 B737-800 两种机型荷载水平,将其简化为作用于板中的圆形均布荷载,以验证选用本构模型与参数的合理性。

首先对不同模型的尺寸效应进行对比,选取未脱空道面板,尺寸分别为 5 m、10 m、15 m,如图 3 所示。

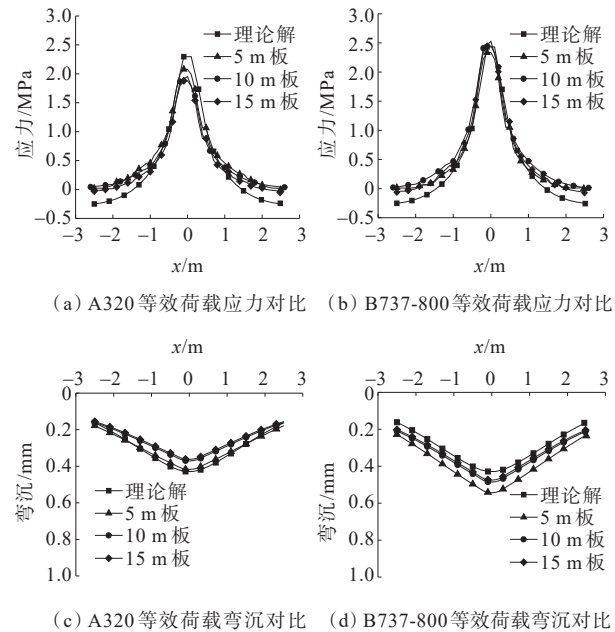


图 3 数值模拟与简化理论解的对比分析

Figure 3 Comparison between numerical simulation results and simplified theoretical values

由图 3 可以看出:不同道面板尺寸下板底弯拉应力的数值模拟结果与理论解均较吻合。对于 5 m 板的两种机型,相对误差分别为 9.51%、3.98%。总体上,道面模拟尺寸越大,相对误差越小。对于 B737-800 机型,在等效单轮荷载作用下,15 m 板板底应力相对误差仅为 0.62%。图 3(c)、(d)为不同机型的弯沉值对比结果,数值模拟与理论解道面弯沉规律一致,均在荷载作用处形成了沉降槽。A320 机型的等效荷载与面积均较小,因此道面弯沉值更小。总体上,数值模拟得到的道面弯沉结果较为保守,道面板尺寸越大,弯沉值越小。对于 A320 机型,弯沉的数值模拟

与理论解的相对误差仅为0.73%。从上述对比可以看出,采用有限差分数值模拟与相关参数可以合理反映道面的受力与变形情况,在此基础上,对道面脱空进行分析可行。

2 脱空深度与面积对道面结构的综合影响

2.1 脱空深度的单因素影响规律

图4为不同脱空面积、机型、板宽下脱空深度对道面结构弯沉与弯拉应力的影响规律。

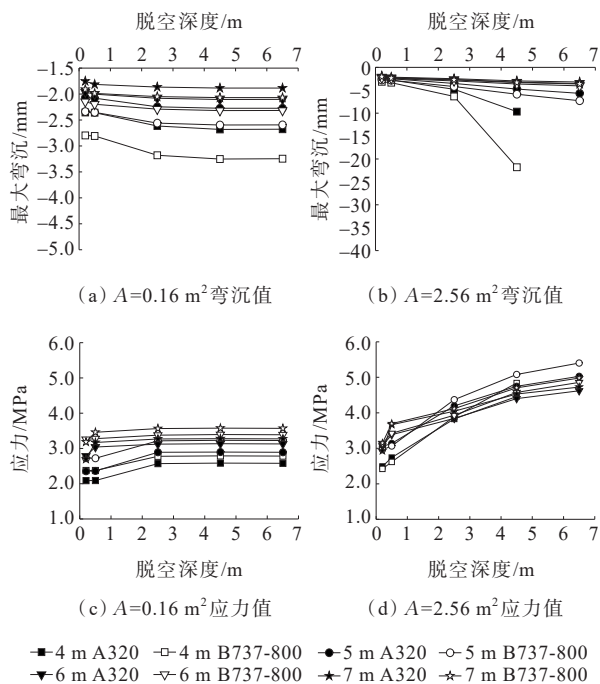


图4 脱空深度对飞机荷载作用下道面弯沉与应力的影响
Figure 4 Influence of cavity depth on runway bending and stress under aircraft load

由图4可知:①随着脱空深度 h 的增加,道面弯沉及弯拉应力逐渐增大,对于大多数工况,增速逐步变缓。对比不同板宽结果可知,更大的道面板尺寸将引发更小的脱空弯沉和更大的弯拉应力;②不同脱空面积将引发脱空深度不同,当脱空面积较小(如 $A=0.16\text{ m}^2$ 工况),脱空深度仅在2 m范围内影响显著,此后变化不大;当脱空面积较大时(如 $A=2.56\text{ m}^2$ 工况),不仅弯沉增加明显,道面弯拉应力也显著增加;对于尺寸较小板块[如4 m板,图4(b)],弯沉值突增,过大的脱空深度将引发土体或道面结构的破坏或坍塌,这表明脱空面积 A 对脱空深度具有制约作用,当脱空面积较大时,将引发脱空深度的影响显著

提升。两者在道面结构具有耦联影响效应,各模拟工况均体现出相似规律。

2.2 脱空深度与面积综合作用规律

图5为由多工况模拟(表3)得到的脱空面积 A 与脱空深度 h 对道面弯沉的综合影响图。

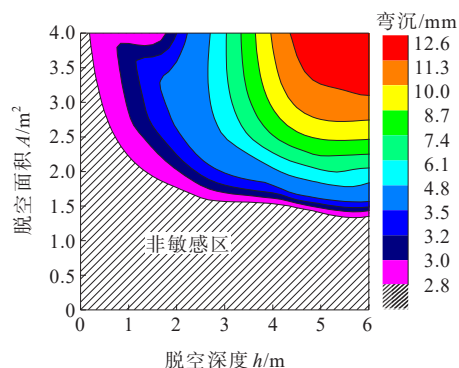


图5 道面板弯沉最大值随脱空深度的变化规律
Figure 5 Variation of maximum runway bending with cavity depth

由图5可知:

(1) 对于不同脱空面积,脱空深度对其影响的敏感性各不相同。当脱空(脱空面积小于 1.5 m^2)较小时,道面板弯沉随道面板脱空深度增加的趋势不明显,道面板的弯沉对脱空深度的变化不敏感(总体小于 2.8 mm);当脱空面积超过 1.5 m^2 (脱空率大于6%)后,脱空深度的增加将引发道面弯沉的急剧增长。

(2) 当脱空深度较小时,道面弯沉随脱空面积增长变化不明显;当脱空深度($h>2.5\text{ m}$)较大时,道面弯沉随脱空面积急剧增加,这将严重威胁道面的结构安全,甚至发生断板等破坏。

(3) 综合脱空深度与脱空面积,两者对道面弯沉存在影响敏感区与非敏感区。当脱空(土基松动)位于非敏感区时,应评估道面的剩余使用寿命与病害发展情况,采用适当策略进行修复;当道面脱空(土基松动)位于敏感区内时,需要立即进行抢修与治理,避免进一步引发结构破坏。

道面弯沉值随脱空面积的发展速率是不断变化的,仅用弯沉值难以掌握其发展速率,定义弯沉发展指数 α 描述其随脱空面积的发展情况,如式(5)所示:

$$\alpha = \frac{dw}{dA} \quad (5)$$

式中: w 为道面弯沉值; α 值表征道面弯沉随脱空面积发展的速度(mm/m^2)。

α 值与脱空面积、脱空深度关系如图 6 所示。

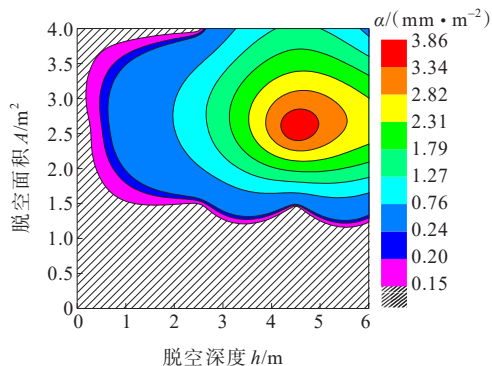


图 6 不同脱空程度脱空弯沉发展指数的分布规律

Figure 6 Distribution law of cavity bending development index with different cavity degrees

由图 6 可以看出:弯沉发展指数 α 存在峰值区域,在脱空深度为 4.5 m,脱空面积为 2.5 m²(脱空率 10%)时达到峰值,因此当脱空面积增加或脱空深度逐渐增加时,道面弯沉发展速率均呈先增大后减小趋势。此外,存在与“非敏感区”较为一致的“缓变区”,在该区域内道路弯沉增速变化幅度较小,均小于 0.15 mm/m²,当超出缓变区,弯沉受脱空体发展影响的程度将逐步增加。综合上述分析,当脱空率超过 6% 后,建议密切关注脱空深度、分析道面结构状态,并尽快采取治理措施。

脱空面积与深度对道面板弯拉应力的综合影响如图 7 所示。

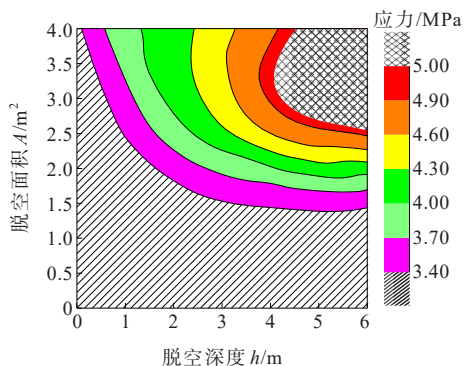


图 7 道面最大弯拉应力随脱空深度的变化规律

Figure 7 Variation law of maximum runway bending-tensile stress with cavity depth

由图 7 可以看出:

(1) 道面最大弯拉应力随着脱空面积 A 与脱空深度 h 的增大而增大,且与对道面弯沉的影响一致,存在非敏感区。在非敏感区内,脱空程度的发展对

弯拉应力的增量贡献不敏感。当进入敏感区,道面弯拉应力将迅速增大。非敏感区与敏感区的边界成 1/4 圆弧状。

(2) 道面弯拉应力设计值为 5 MPa,随着脱空面积与深度的增加,道面将形成破坏区,出现断板、塌陷等破坏。破坏区由脱空面积与脱空深度共同决定,主要出现在综合影响图的右上角。脱空程度不同,道面的力学状态与分析方法也明显不同。当脱空处于非敏感区时,此时对道面结构的分析仍为疲劳破坏问题,不会出现瞬时破坏。随着脱空发展,进入敏感区后,此时道面在飞机作用下逐渐出现承载力问题;当脱空发展至破坏区,道面将发生结构性破坏。

定义应力发展指数 β 描述板边最大弯拉应力随脱空面积 A 的发展速率,如式(6)所示:

$$\beta = \frac{d\sigma}{dA} \quad (6)$$

式中: σ 为板边最大弯拉应力。

应力发展指数 β 与脱空面积 A 与脱空深度 h 的关系如图 8 所示。

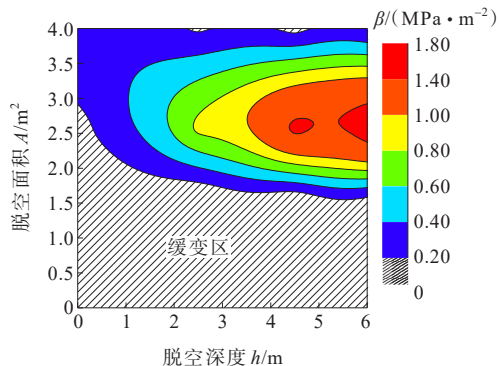


图 8 不同脱空程度脱空应力发展指数的分布规律

Figure 8 Distribution law of cavity stress development index with different cavity degrees

由图 8 可知:当脱空深度一定时, β 值越大,随脱空面积的增大道面板的应力增长速率越快,这说明脱空面积对道面板的应力影响更显著。道面弯拉应力与弯沉规律较为一致,同样存在较为明显的缓变区,缓变区的边界即为临界脱空面积 A_0 ,当脱空面积超过 A_0 ,脱空深度 h 的影响才开始显现。总体上,随着 h 的增加, β 值逐步增大,最终将引发结构破坏。当脱空面积小于 A_0 时,道面弯沉与应力均处于非敏感区与缓变区,此时脱空主要影响道面的长期使用寿命。

3 考虑脱空深度的刚性道面剩余寿命分析

无论是浅层脱空,还是深层脱空,均将影响道面结构的使用寿命。脱空后会增大道面弯拉应力,使其更易发生疲劳破坏,同时还会产生各类病害。依据《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T5004—2010)^[16],根据混凝土小梁弯拉疲劳强度的试验结果,计算出允许作用次数 N_e ,进而计算道面的使用寿命,然而该方法与实际道面实际工作状态之间存在较大差异。道面使用寿命的降低往往以其结构性能下降为指标,仅考虑材料疲劳破坏无法反映结构的综合性能。

结构状况指数是评价道面服役性能的重要指标,当道面新建成时,结构状况指数值(I_{SCI})为100;考虑使用过程中道面结构的各种损害类型,设置不同的折减值,并根据损害密度对初始结构状况指数进行折减;当 I_{SCI} 低于80时,道面结构的破坏已较为严重^[2],无法正常服役。因此,提出一种基于结构状况指数衰减分析的方法,评估脱空对道面使用寿命的影响,其流程图如图9所示。首先,根据精细化数值分析模型,分析脱空对道面板弯拉应力的影响;其次,建立 I_{SCI} 随应力比 R_{SR} 、机轮覆盖作用次数 C 的关

系模型;再次,由机场运行规模基于上述关系模型推出该机场的应力比与结构状况指数的唯一对应关系,通过多种脱空检测手段得到机场脱空发展情况^[24-26],并基于此分析脱空对 I_{SCI} 的影响,当道面 I_{SCI} 仍有剩余时,计算道面脱空条件下的剩余使用寿命,反之需要修复道面。最后根据该机场可能脱空的各种情况,绘制脱空发展对道面剩余寿命的综合影响图。

3.1 考虑 I_{SCI} 指数衰减的道面寿命评价模型

大量道面足尺试验与实测结果表明,道面弯拉应力比 R_{SR} 与 I_{SCI} 存在如下关系^[2]:

$$\frac{1}{R_{SR} \cdot F_{cal}} = \left[\frac{F'_s b d}{(1 - \frac{I_{SCI}}{100})(d - b) + F'_s b} \right] \times \log C + \left[\frac{(1 - \frac{I_{SCI}}{100})(ad - bc) + F'_s b c}{(1 - \frac{I_{SCI}}{100})(d - b) + F'_s b} \right] \quad (7)$$

式中: 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,当考虑50%的破坏点时可取 $a=0.760$, $b=d=0.160$, $c=0.857$ 。结构应力比 R_{SR} ,计算如式(8)所示:

$$R_{SR} = \sigma_p / f_{cm} \quad (8)$$

式中: σ_p 为板边计算弯拉应力; f_{cm} 为混凝土弯拉强度设计值。

式(8)中通行覆盖作用次数 C 与飞机的实际起降次数 p 通过轮迹横向分布进行换算^[27]。

根据式(8),若已知某机型在某一机场的运行规模,则基于上述考虑道面结构状况指数的应力比 R_{SR} 与覆盖作用次数 C 的关系模型可估算机场道面的 I_{SCI} 。以中国民航机场运行数据为例,根据机场年起降架次为20.0万、5.0万、0.5万架次,分别将中国机场划分为大型、中型、小型3个等级的机场,再绘制出3个规模的机场道面 I_{SCI} 与 R_{SR} 的关系,如图10所示。根据 I_{SCI} 限值可得到不同类型机场的临界应力比 $R_{SR,max}$,机场越繁忙,可允许的 $R_{SR,max}$ 越小,对道面结构应力的要求也越严格。

3.2 脱空深度对道面剩余寿命的影响

根据脱空对道面弯拉应力最大值的影响,结合上述结构状况指数衰减模型,分析脱空引发的道面寿命

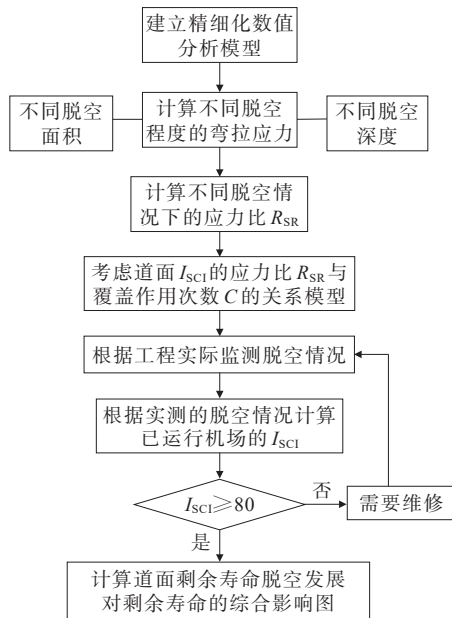
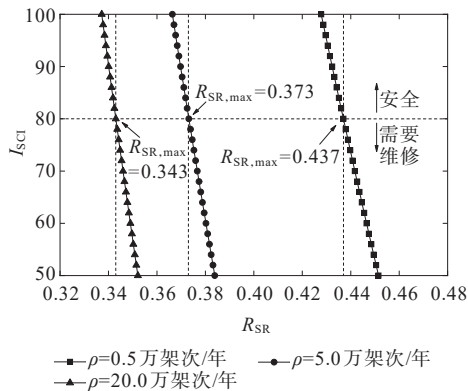


图9 道面剩余寿命快速评价流程

Figure 9 Rapid evaluation process of remaining life of runway

图 10 不同规模机场道面 I_{SCI} 与 R_{SR} 关系对比Figure 10 Comparison of relationship between I_{SCI} and R_{SR} of airfield runway of different scales

衰减情况。在不同脱空程度以及 A320 和 B737-800 机型作用下,脱空率为 9% 的道面板剩余使用寿命分析结果如表 5 所示。引入某机场的年起降架次进行计算, A320 和 B737-800 年起降架次均为 5 000 架次的小型机场,列出两个机场的道面剩余使用寿命。

表 5 道面脱空对其剩余寿命的影响

Table 5 Influence of runway cavity on its remaining life

脱空深度/m	机型	应力比	覆盖作用次数/次	剩余使用寿命/年
0.2	A320	0.421 8	38 300	27.11
	B737-800	0.478 8	17 657	7.63
0.5	A320	0.447 2	30 649	21.69
	B737-800	0.480 1	13 079	7.38
2.5	A320	0.544 2	2 947	2.09
	B737-800	0.562 2	2 085	1.23
4.5	A320	0.545 0	2 900	2.05
	B737-800	0.563 9	2 016	1.19
6.5	A320	0.547 1	2 777	1.97
	B737-800	0.564 5	1 994	1.18

由表 5 可以看出:道面板脱空时,其剩余使用寿命随脱空深度的增大而缩短。当脱空深度不超过 0.5 m 时, A320 为主要机型机场的剩余使用寿命都超过了 20 年,而以 B737-800 为主要机型机场剩余使用寿命仅 8 年左右;当脱空深度达到 2.5 m 时,其剩余寿命迅速下降,均不足 2 年,此时道面的服役安全是由结构承载能力决定的。当道面出现脱空等结构病害时,根据不同脱空程度所对应的应力比与临界应力 $R_{SR,max}$ 的关系,判断是否需要道面结构进行修复。

对于该文所研究的道面结构,以 A320 为主要机型荷载,年起降架次为 5 000 架次的小型机场,脱空深度与脱空面积(除以道面板尺寸后以脱空率表示)对使用寿命的综合影响如图 11 所示。

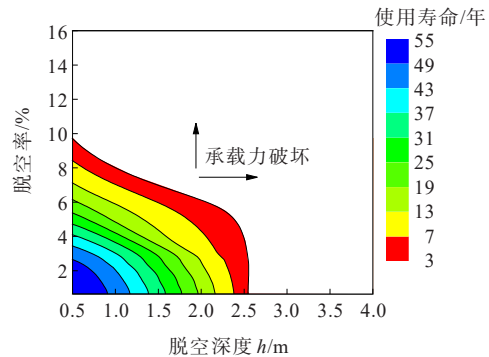


图 11 脱空发展对道面剩余寿命的综合影响图

Figure 11 Contour of comprehensive influence of cavity development on remaining life of runway

由图 11 可知:当出现较小面积脱空时,图中的道面使用寿命偏大,这是由于该文的道面结构设计是针对大型机场的,而对于小型机场,道面厚度将相应变薄,使用年限也将随着交通量的上升而缩短。对于分析工况,当脱空率超过 6% 时,将显著影响道面设计使用寿命,同时脱空深度的增加对其使用寿命影响明显;当脱空率超过 10% 或脱空深度超过 2.5 m,将导致道面使用寿命小于 3 年,甚至发生承载力破坏,必须进行大修。利用该图可以快速评价脱空面积和深度对其使用寿命的综合影响。当脱空面积或深度过大,脱空将引发承载力破坏。不同设计使用年限、不同荷载等级、不同道面结构、不同交通量均将改变道面剩余寿命,因此需要进行针对性计算。

4 结论

本文通过 208 个有限差分模型算例,进行了大规模数值模拟分析。在利用理论解对模型进行验证的基础上,研究不同脱空深度与脱空面积综合影响下刚性道面的工作性能,得到主要结论如下:

(1) 脱空深度与脱空面积对道面结构性能的影响是相互耦合的。存在一个临界脱空面积,只有当脱空面积超过该值,才会导致道面弯拉应力的迅速增加;脱空面积的大小制约了脱空深度的影响趋势,即当脱空面积较大时,脱空深度的影响才开始显现。

(2) 在脱空深度与面积对道面弯沉与应力的影

响云图中,均存在非敏感区。当脱空率超过6%时,脱空对道面弯沉与应力的影响愈发显著。提出道面弯沉速率发展指数与应力发展指数来评价脱空的影响趋势。对于不同的脱空面积与深度,这两个指数均存在峰值区域。

(3) 提出了一种考虑道面结构状况指数衰减的脱空对道面使用寿命的评价方法,并分析了判别脱空状态的临界应力比指标;道面脱空面积与脱空深度的增加均会导致其剩余使用寿命的降低;针对不同的荷载、道面结构、机场规模,建立了脱空程度与剩余使用寿命的影响图,为快速评价脱空的影响提供了依据。

参考文献:

References:

- [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.
GUO Yang. Quantitative analysis and residual life prediction of void beneath airport rigid pavement[D]. Xi'an:Chang'an University,2019.
- [2] 戴轩,蔡靖,李香香,等. 脱空尺寸对机场刚性道面的影响及其使用寿命分析[J]. 中外公路,2022,42(6):47-52.
DAI Xuan, CAI Jing, LI Xiangxiang, et al. Influence of void size beneath airport concrete pavement and pavement life analysis[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42 (6):47-52.
- [3] 曾孟源,赵鸿铎,吴荻非,等. 基于振动感知的混凝土铺面板底脱空识别方法[J]. 中国公路学报,2020,33(3):42-52.
ZENG Mengyuan, ZHAO Hongduo, WU Difei, et al. Identification of cavities underneath concrete pavement based on pavement vibration[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3):42-52.
- [4] 王奕丹. 考虑隐蔽病害的机场道面剩余寿命预测评价指标研究[D]. 郑州:郑州大学,2020.
WANG Yidan. Prediction evaluation of airport pavement remaining life research considering hidden disease index [D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2020.
- [5] 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.
HUANG Yong, YUAN Jie, TAN Yue, et al. Identification of void beneath airport cement concrete pavement and its influence[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(6):861-866.
- [6] 中国民用航空局. 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.
Civil Aviation Administration of China. Specification for pavement evaluation and management of civil airports: MH/T 5024—2019[S]. Beijing:China Civil Aviation Press, 2019.
- [7] 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):1-5,12.
CHENG Guoyong, WANG Cuiling, GUO Zhiguang. Research on quantitative analysis model of void airport pavement slab[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(9):1-5, 12.
- [8] ALLEN G E, PACKARD R. New pca thickness design for concrete highway and street pavements[J]. Publication of Balkema, 1984(9):75.
- [9] THOMPSON M, BARENBERG E, CARPENTER S, et al. Calibrated mechanistic structural analysis procedures for pavements. volume I -final report; volume II -appendices [J]. Fatigue, 1990(3):793.
- [10] 赵鸿铎,曾孟源,吴荻非,等. 脱空对刚性道面板应力分布的影响及临界脱空状态[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(2):243-253.
ZHAO Hongduo, ZENG Mengyuan, WU Difei, et al. Effect of support-loss on stress distribution of airport concrete pavement slab and critical support condition[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(2):243-253.
- [11] 滕力鹏,谭悦,柴震林. 中国机场水泥混凝土道面脱空状况分析与评价[J]. 中国民航大学学报,2013,31(6):41-45.
TENG Lipeng, TAN Yue, CHAI Zhenlin. Analysis and evaluation on void condition of China's airport cement concrete pavement[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013, 31(6):41-45.
- [12] 葛思彤. 基于板底脱空的机场道面动力损伤机理研究 [D]. 天津:中国民航大学,2020.
GE Sitong. Study on the dynamic damage mechanism of airport pavement based on the void beneath pavement[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [13] 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.
LIAO Fangfang. Study on fatigue life of cement pavement based on time history analysis of void evolution at the bottom of slab[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [14] KERMANI B, XIAO M, STOFFELS S M, et al. Reduction of subgrade fines migration into subbase of flexible

- pavement using geotextile[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(4): 377-383.
- [15] 曾晓辉, 刘海川, 兰旭丽, 等. 水泥混凝土路面板底脱空区动水压力特性研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(3): 1-8.
ZENG Xiaohui, LIU Haichuan, LAN Xuli, et al. Study on hydrodynamic pressure characteristics of void beneath cement concrete slab[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(3): 1-8.
- [16] 中国民用航空局. 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: 16-17.
Civil Aviation Administration of China. Specifications for airport cement concrete pavement design: MH/T 5004—2010[S]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2010: 16-17.
- [17] 郭云飞, 郭成超, 闫卫红. 飞机荷载作用下道面板脱空区域受力特性分析[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 36-43.
GUO Yunfei, GUO Chengchao, YAN Weihong. Analysis of mechanical characteristics of void area of road deck under the load of the aircraft[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 36-43.
- [18] 刘文, 凌建明, 赵鸿铎. 考虑接缝影响的机场水泥混凝土道面结构响应[J]. 公路交通科技, 2007, 24(12): 15-18, 23.
LIU Wen, LING Jianming, ZHAO Hongduo. Analysis on mechanical responses of rigid airport pavement with load transfer of joints[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(12): 15-18, 23.
- [19] BRILL D R, PARSONS I D. Three-dimensional finite element analysis in airport pavement design[J]. International Journal of Geomechanics, 2001, 1(3): 273-290.
- [20] 刘诗福, 凌建明, 杨文臣, 等. 刚性路面弯沉盆平均距离反演方法及综合分析[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 74-81.
LIU Shifu, LING Jianming, YANG Wenchen, et al. Back-calculation of rigid pavement parameters using average distance of deflection basin and its comprehensive analysis [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 74-81.
- [21] 翁兴中. 机场道面设计[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2017.
WENG Xingzhong. Design of airport pavement[M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [22] 姚炳卿, 王威龙. 机场刚性道面当量单轮荷载的计算原理及其图表[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(2): 43-53.
YAO Bingqing, WANG Weilong. The calculating principles and charts of equivalent single wheel load for airport rigid pavements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(2): 43-53.
- [23] 胡洪龙, 谈至明, 朱唐亮, 等. 机场柔性道面结构的飞机当量单轮荷载[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 16(2): 15-18, 42.
HU Honglong, TAN Zhiming, ZHU Tangliang, et al. Equivalent single wheel load of airport flexible pavement structures[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2015, 16(2): 15-18, 42.
- [24] ZHANG J, LU Y M, YANG Z, et al. Recognition of void defects in airport runways using ground-penetrating radar and shallow CNN[J]. Automation in Construction, 2022, 138: 104260.
- [25] 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.
WU Qiushuang, WANG Qiren, PI Haikang. Analysis on the image features of ground penetrating radar for cavity of concrete pavement[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 181-185.
- [26] 张宇辉, 张献民. 机场道面及其下部地基脱空的测试方法[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(6): 1-11.
ZHANG Yuhui, ZHANG Xianmin. Test methods of airport pavement and subjacent foundation void[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(6): 1-11.
- [27] 张献民, 李梦晓, 陈宇, 等. 机场跑道水泥混凝土道面板尺寸分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(4): 551-559.
ZHANG Xianmin, LI Mengxiao, CHEN Yu, et al. Size of cement concrete pavement slab of airport runway[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(4): 551-559.