

飞机荷载作用下道面板脱空区域受力特性分析

郭云飞¹, 郭成超^{1,2*}, 闫卫红³

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510000;

3. 河南省机场集团有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要:为了研究机场水泥混凝土道面板的脱空问题,利用有限元软件建立机场道面结构的立体三维模型,计算在自重应力以及飞机荷载作用下道面板的应力分布情况,研究不同脱空面积沿着接缝处于不同位置时的受力特性。计算结果表明:在自重应力作用下,除在脱空中部产生应力集中外,在脱空边缘即脱空区与非脱空区的临界面也会产生应力集中现象;在飞机荷载作用下,在脱空区域中部产生应力集中,且脱空面积大的面板在应力峰值方面要比脱空面积小的增大。因此,对于板底脱空区域要跟踪检测及时处理,防止脱空进一步加剧。

关键词:飞机荷载;道面脱空;应力分布;动力响应

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

机场道面是指在天然土基和基层顶面用筑路材料铺筑的一层或多层人工结构物,是供飞机起飞、着陆、滑行及维修、停放的道坪,如跑道、滑行道等。机场道面的质量是关乎飞机能否安全起降的重要因素,因此机场道面对平整度、强度、粗糙度、稳定性都有着极高的要求。而其中现服役机场形式多为水泥混凝土道面板,机场水泥混凝土道面板在实际使用过程中,由于飞机荷载的反复作用,基层以及土基不断受到挤压,塑性变形不断累积从而在道面板与基层之间形成空隙,导致脱空。此外,由于道面板接缝材料的部分缺陷导致地面水沿接缝下渗,地面水积聚在脱空的空隙内,在飞机荷载的反复压力下,形成唧泥,更加剧了脱空的发展。脱空区不断扩大,混凝土面板易发生疲劳破坏,加上施工原因本来就存在的裂缝以及小脱空区,易导致裂缝的拓展,更严重造成板角断裂以及龟裂。

长期以来,国内外非常重视机场道面设计问题,在机场道面安全评估、数值模拟以及试验研究方面都取得了很大进展。在机场安全评估方面,MH/T 5024—2009《民用机场道面评价管理技术规范》^[1]建立了民用机场道面剩余寿命的评价体系,并提出通过模量反算计算剩余寿命的方法;赵鸿铎等^[2]采用数据挖掘技术中的C5.0决策树算法,建立了机场水泥混凝土道面板维护辅助决策模型,并开展评价和应用;Wu, Zhong

等^[3]提出了一种将路面状况调查数据与现有路面层强度相关联的简单方法;Mansour Fakhri等^[4]通过使用人工神经网络开发了由落锤式弯沉仪(FWD)得出的弯沉值与路面性能指标国际平整度(IRI)和路面表面评价等级指数(PASER)之间的关系。在数值模拟方面,凌建明等^[5]分析了飞机胎压不均匀接触应力对沥青道面结构动力响应的影响,从而得出环氧沥青铺装材料具有更好的适用性;凌道盛等^[6]针对高填方山区机场道基沿跑道方向挖填交替的特点,通过沿跑道横向Fourier变换,提出适用于飞机移动荷载作用下山区机场跑道动力响应分析的半解析有限单元法,并编制了相适应的有限元分析程序;Barker^[7]模拟了静载作用下路基及路面的协同变形规律,分析其竖向及横向应力变化。在试验研究方面,戴经梁等^[8]依托西安和耒阳的室内外试验段,使用刚性承载板、千斤顶、反力架及疲劳试验机,通过疲劳试验机重复加载模拟飞机荷载,研究薄层沥青混凝土面层+水泥稳定细粒土基(垫)层道面结构在重复荷载作用下的疲劳特性;Hardy等^[9]研究了轮胎胎压的影响因素,并在计算算例中使用了动荷系数;蔡靖等^[10]利用试验模型,分析机场复合道面转弯区应力变化情况,探究转弯速度及其铺层厚度对应力的影响。

针对机场道面,国内外学者所做的研究大多基于

收稿日期:2020-11-18

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2016YFC0802203)

作者简介:郭云飞,男,硕士研究生。E-mail:guoyunfei0213@163.com

* 通信作者:郭成超,男,博士,副教授。E-mail:guoccc@zzu.edu.cn

完好的道面。但在机场道面的服役过程中,由于飞机重型荷载的作用,以及基层或道基本身存在天然缺陷,极易在道面板的板缝及板角处形成脱空。在脱空区域周围,力学响应发生变化且产生较大应力集中及变形,不仅使得承载力减小,而且使得发生裂缝的概率大大增加。目前国内外对道面脱空的研究基本集中于脱空的识别及判定。黄勇等^[11]根据现场试验数据的收集以及理论研究的分析,提出了基于弯沉数据判定水泥混凝土道面板脱空的判定标准;卢艳楠和肖昭然^[12]结合郑州机场二期工程,根据注浆修复前后探地雷达的检测数据,证明了探地雷达在机场道面脱空判断的可行性。然而在道面脱空后的力学响应分析的研究十分有限,因此,该文基于有限元软件,利用 Fortran 语言编写子程序,实现移动荷载的施加,开展自重应力以及飞机荷载下水泥混凝土道面板的脱空位于不同位置时的应力分布以及动力响应分析。

1 工程概况

某机场北跑滑道面系统自 2015 年底建成投运,作为主起降运行区域,至今已运行 4 年,北飞行区等级为 4F。2016 年 4 月 25 日至 26 日,笔者所在研究团队利用探地雷达(100 MHz 天线)与重锤式弯沉仪对北跑道部分道面进行无损综合检测,目的是查明所测区域内引起异响的道面下方土体密实情况以及脱空病害。经检测,部分道面在板角及板边位置发生脱空,甚至部分检测到的脱空位置已在板面上形成裂缝或板角断裂。该文基于该机场脱空情况进行有限元建模分析。

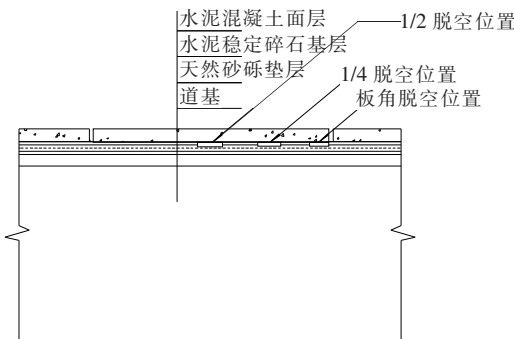


图2 脱空区布置图

2.2 模型介绍

该文采用有限元软件 Abaqus 建模,基于前期学者所做研究^[13-16],模型长宽设置为 15.04 m,高定为

2 机场道面板脱空模型建立

2.1 模型工况概述

机场道面在实际使用过程中,由于飞机重型荷载的重复作用,机场道面板下部容易造成小面积的塑性变形区域,造成面板脱空。施工未达到设计要求、维护不当、新型大型飞机的投入使用以及近来飞机起降次数增多,甚至会造成道面板下部大面积的脱空。道面板脱空对脱空边缘的道面板极为不利,容易造成应力集中,发生剪切破坏,形成裂缝。若脱空发生在缝边板角处,则道面板将近似于悬臂梁,板边会产生过量的变形和应力,在飞机荷载的重复作用下,将形成板角裂缝。

脱空、重载以及温度是导致裂缝的重要因素,脱空面积和脱空位置是影响裂缝形成的关键因素。因此取面板下方脱空区域厚度 2 cm,面板厚度 0.36 m,长宽为 0.4 m×0.4 m 和 0.8 m×0.8 m 进行对比。结合单块道面板的长度以及道面板的对称布置情况,且实际情况脱空多发生在板角及板边位置^[11],故将脱空区分别布置在道面板 1/2 处、道面板 1/4 处以及道面板边缘。计算模型图见图 1,具体脱空区布置见图 2。

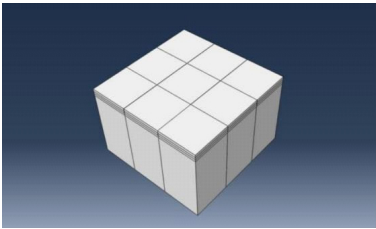
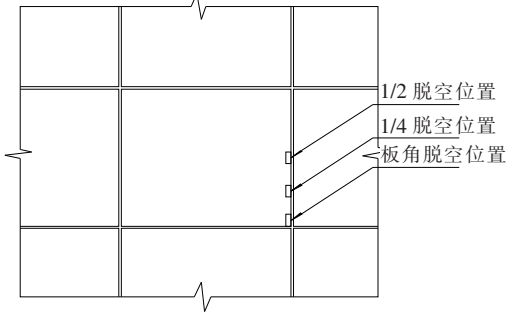


图1 计算模型结构图



9.96 m。道面结构从上至下依次是:水泥混凝土面层,厚度设置为 0.36 m;水泥稳定碎石基层,厚度设置为 0.3 m;天然砂砾垫层,厚度设置为 0.3 m;道基设

置为 9 m。机场道面的面层、基层以及垫层视为完全弹性体,而道基使用摩尔库仑模型模拟,内摩擦角及黏聚力见表 1。结合现场实际尺寸设置道面板尺寸为 5 m×5 m,道面板板块之间设置 2 cm 宽的接缝,接缝材料使用沥青橡胶,忽略其传递荷载的能力^[17]。传力杆采用半径 13 mm 的光圆钢筋,采用梁单元模拟。各种材料参数汇总于表 1。

2.3 飞机荷载的模拟

中国在进行机场道面设计时,一般假设飞机与道面接触的轮迹为一个类椭圆形,可看成两个半圆和一个矩形组成^[18]。但在有限元软件计算时,考虑到精度要求以及保证一定的计算效率,可简化模型,按照总面积相等的原则,假定轮胎为矩形接触面积^[19]。等效示意图如图 3 所示。

表 1 材料参数

| 道面结构层 | 材料类型 | 厚度/ cm | 密度/ (kg·m ⁻³) | 弹性模量/ MPa | 泊松比 | 黏聚力/ kPa | 内摩擦角/ (°) |
|-------|--------|-----------|------------------------------|--------------|------|-------------|--------------|
| 面层 | 水泥混凝土 | 36 | 2 400 | 36 000 | 0.15 | | |
| 基层 | 水泥稳定碎石 | 30 | 2 300 | 1 500 | 0.25 | | |
| 垫层 | 天然砂砾 | 30 | 1 800 | 200 | 0.30 | | |
| 道基 | 土 | 900 | 1 920 | 50 | 0.35 | 35 | 10 |

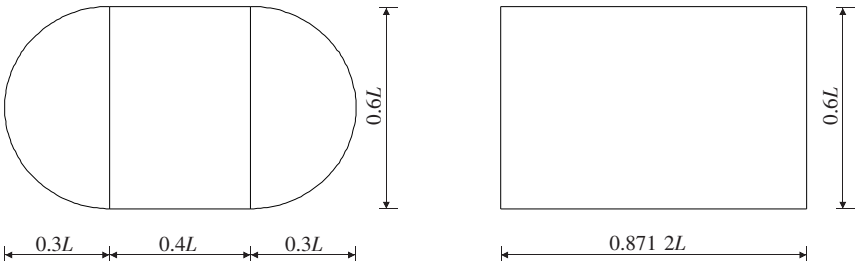


图 3 轮印面积等效示意图

鉴于飞机轮胎接触应力分布规律与汽车轮胎相似,且飞机轮胎比汽车轮胎充气压力高,轮重变化幅度小,所以现有的道面设计方法均假设:在轮印范围内,飞机轮胎与道面的接触应力呈均匀分布,且大小等于胎压^[18,20]。该文以 A380—800 客机为例,研究飞机对地面的作用力。模拟飞机移动恒荷载,其中荷载的大小和移动的实现均通过程序子代码实现,代码通过 Fortran 语言编写。

该例中,A380—800 的胎压为 1.47 MPa,其动载系数在滑行道上为 1.25,在跑道中部为 1.0。A380—800 对地面的设计压应力为:1.47×1.25=1.837 5 MPa。故使用此压强作为道面模型移动的荷载大小。

3 自重应力作用下道面板脱空区域的受力特性

3.1 道面板板底无脱空时的应力分布

道面板下部无脱空时,有限元软件计算可得其应

力分布如图 4 所示。从图 4 可看出:道面板板面及板底受力均匀,无应力集中现象。该计算结果可作为分析脱空状况下的道面板应力状况的依据。

3.2 道面板脱空时的受力特征

为分析自重应力作用下道面板脱空导致的应力重分布情况以及应力集中现象,计算可得脱空位于不同位置以及不同脱空面积的应力云图如图 5~7 所示。

根据图 4 道面板板底无脱空的应力云图和图 5~7 的道面板板底脱空的应力云对比可看出:脱空导致了应力集中现象的发生,且道面板板底的应力要比板顶的应力值大。不同位置以及不同脱空面积的应力分布情况不一样。

为更直观地观察板底及板顶应力的变化,沿着脱空中部顺着板边方向取一条 5 m 长的路径,提取飞机荷载移动到该位置时的应力值。路径位置如图 8 所示,提取的应力值曲线如图 9、10 所示。

由图 9 可知:边角脱空时产生的应力峰值最大,越往中部靠拢,应力峰值减小。从 1/4 位置到 1/2 位置

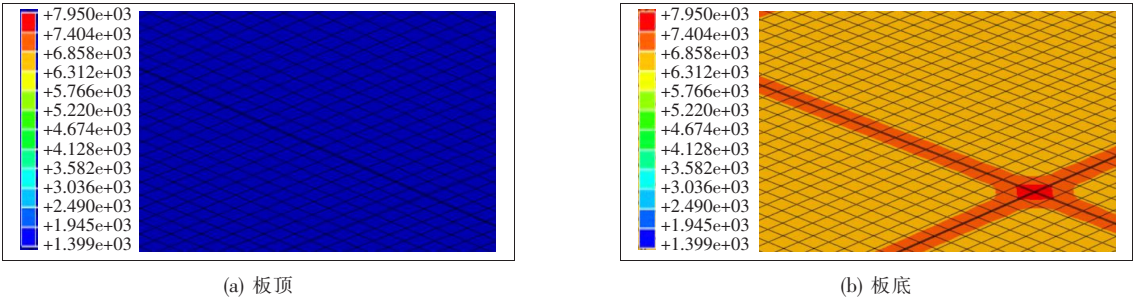


图 4 无脱空板面应力云图(单位:Pa)

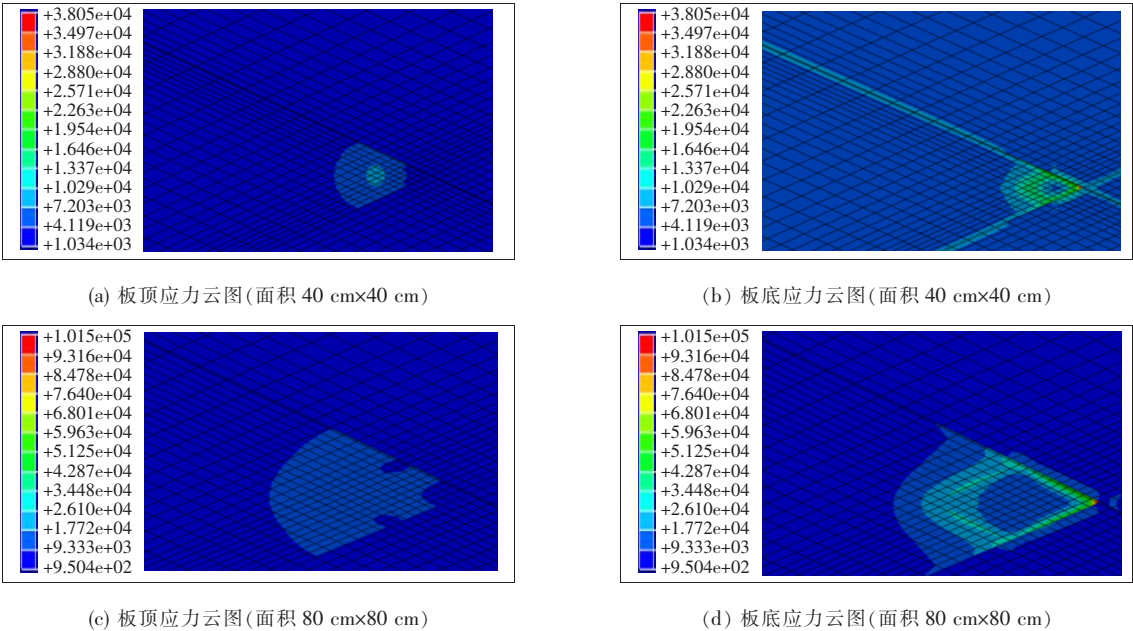


图 5 板角位置脱空应力云图(单位:Pa)

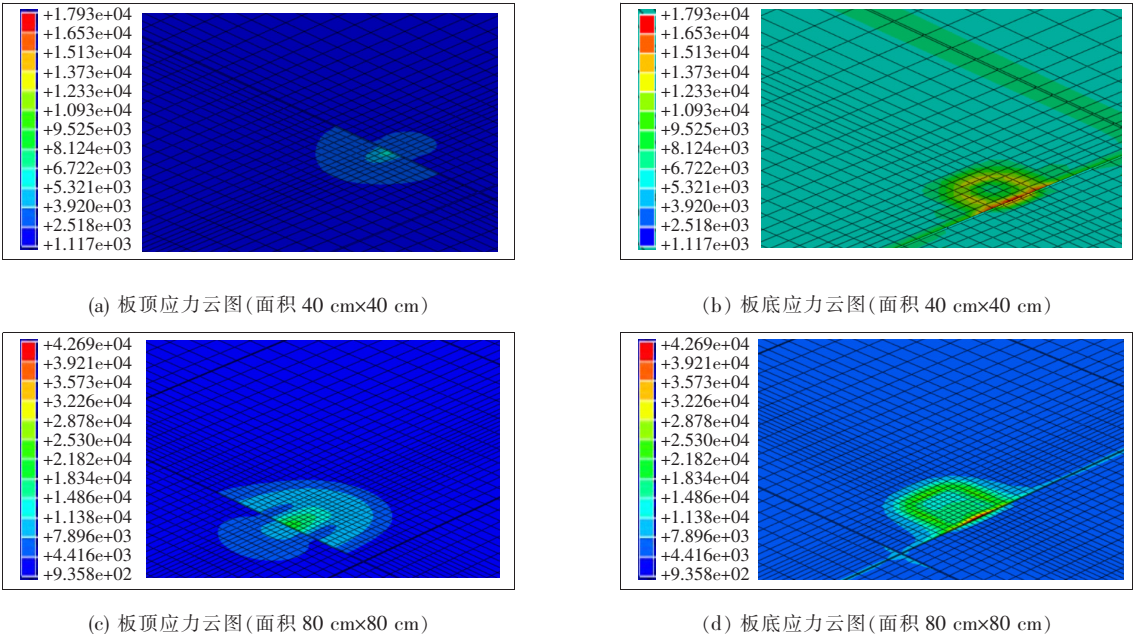


图 6 1/4 位置脱空应力云图(单位:Pa)

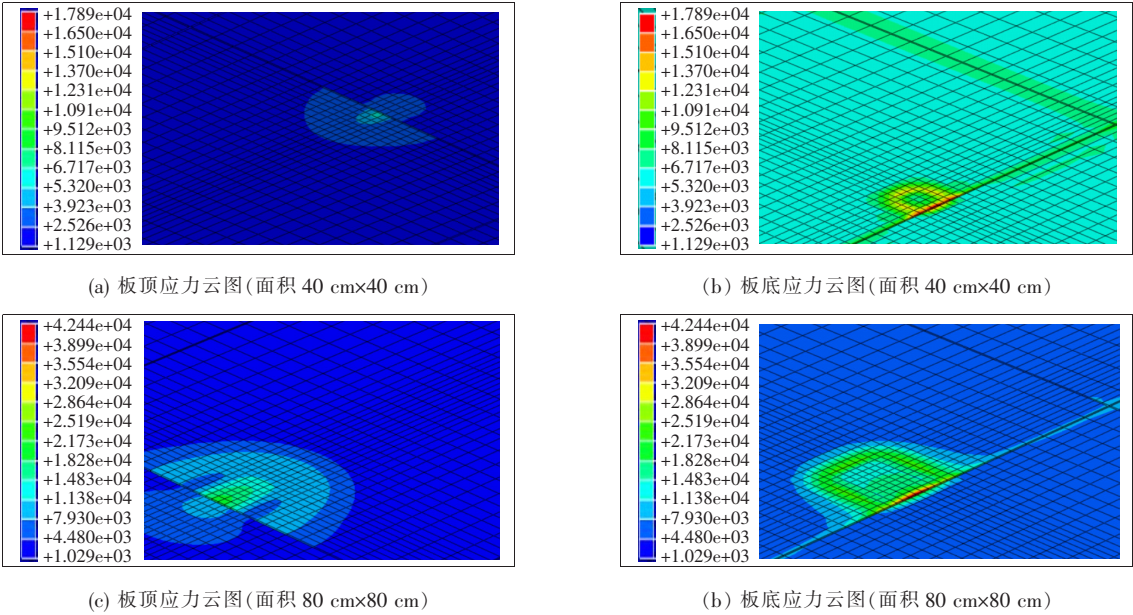


图 7 1/2 位置脱空应力云图(单位:Pa)

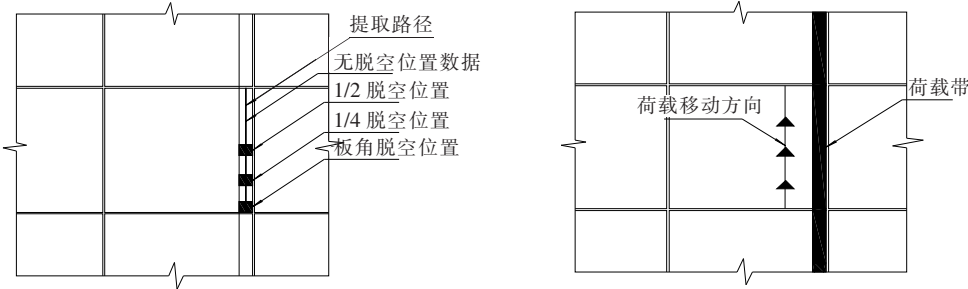


图 8 应力数据提取路径及荷载施加状况

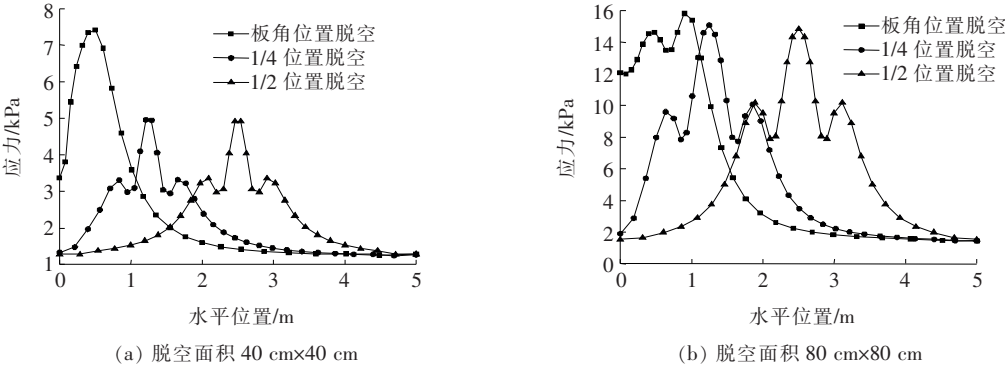
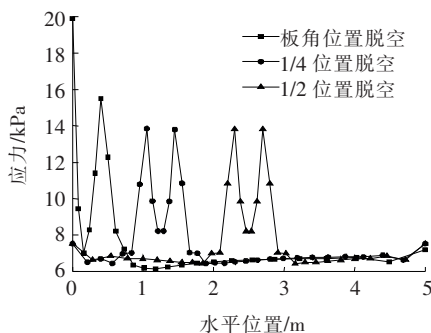


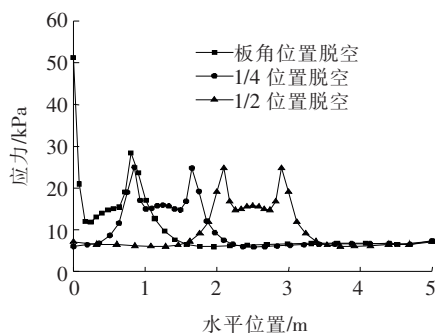
图 9 不同脱空位置板顶应力曲线

应力峰值减小已不明显。当脱空位于 1/2 以及 1/4 时脱空上方面板会在中部出现应力峰值,且在脱空临界处由于剪力作用出现两侧较小的峰值。当脱空位于板角时,脱空上方受力和悬臂梁结构相仿,相比于中部,应力峰值进一步增大。还有,不同大小的脱空面积板顶应力分布规律相似,脱空面积大应力峰值会更大。但不同位置的应力峰值差距会减小。

由图 10 可知:在板底,不同脱空面积的应力分布规律和板顶相似。相比于板顶,板底应力由于深度的原因,应力值进一步增加。板底的应力峰值出现在脱空边缘。从 40 cm×40 cm 到 80 cm×80 cm 的脱空面积,1/2 脱空位置的应力值分别为 14、25 kPa,应力增加了 78.6%。可见,应力值对于脱空宽度非常敏感。



(a) 脱空面积 40 cm×40 cm



(b) 脱空面积 80 cm×80 cm

图 10 不同脱空位置板底应力曲线

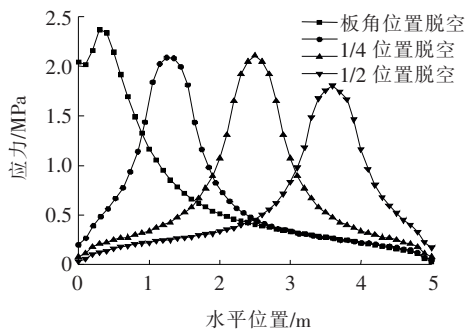
在自重应力作用下,不同脱空面积的应力分布规律基本一致,板顶均会出现一个较大的应力值,板底会在脱空交界处存在两处应力集中的区域,板角处的应力集中最为明显。结合图 4 可以看出,脱空区的存在使得原有的应力状态破坏,在脱空区道面板顶中部产生应力集中,在脱空区道面板底脱空交界处产生应力集中。

4 飞机荷载下道面板的动力响应

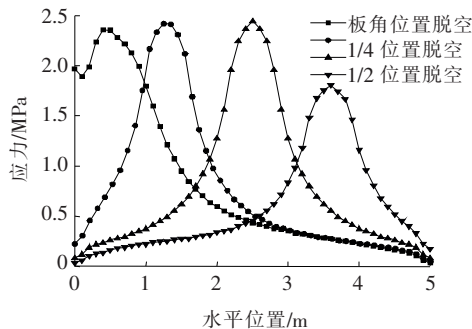
为分析脱空区在飞机荷载作用下的动力响应,飞机沿着图 8 所示位置以 36 km/h 的速度驶过时,在不同面积的脱空区处于不同位置时,沿着先前所取路径提取荷载移动到脱空位置的板顶及板底应力值。

4.1 板顶 Mises 应力曲线分析

飞机荷载作用下不同脱空面积板顶的应力曲线如



(a) 脱空面积 40 cm×40 cm



(b) 脱空面积 80 cm×80 cm

图 11 板顶 Mises 应力曲线

4.2 板底应力 Mises 应力曲线分析

飞机荷载作用下不同脱空面积板底的应力曲线如图 12 所示。

由图 12 可看出:板底应力规律与板顶基本一致。发生脱空时荷载作用位置应力值会增大,且随着脱空面积的增大,应力值也伴随着增加。对比图 11 可知,

图 11 所示。

由图 11 可看出:对比无脱空状态下的应力曲线,发生脱空时荷载作用位置应力值会增大,当脱空面积为 40 cm×40 cm 时,应力峰值从 1.75 MPa 增至 2.1 MPa,增幅 20%;当脱空面积为 80 cm×80 cm 时,应力峰值从 1.75 MPa 增至 2.35 MPa,增幅 34%。可见应力值对脱空面积相对敏感。且随着脱空面积的增大,应力值也伴随着增加。当脱空面积从 40 cm×40 cm 变化到 80 cm×80 cm 时,1/4 及 1/2 位置脱空时的应力峰值从 2 MPa 增至 2.48 MPa,增幅达 24%,由此可见:脱空面积增大可使道面板承受更大的应力,易造成破坏。当脱空发生在板角位置时,由于传力杆的作用,应力值增加幅度并不大。当脱空位置远离板角时,应力峰值不随着位置的变化而发生变化。

板底应力稍大于板顶应力。

4.3 板底横向应力曲线分析

由于混凝土的受力特性,其抗压强度极高,但抗拉强度差,混凝土开裂破坏一般发生在受拉区。故提取板底横向应力在原路径的分布如图 13 所示。

由图 13 可知:① 脱空区域面积的增大会导致板

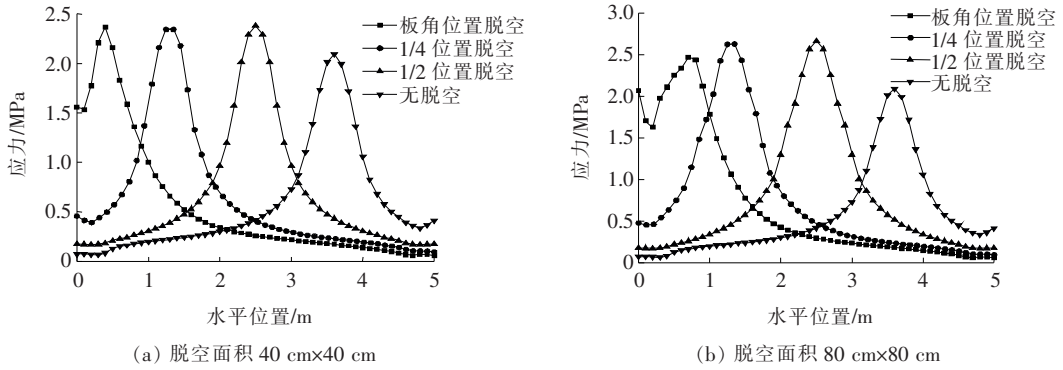


图 12 板底 Mises 应力曲线

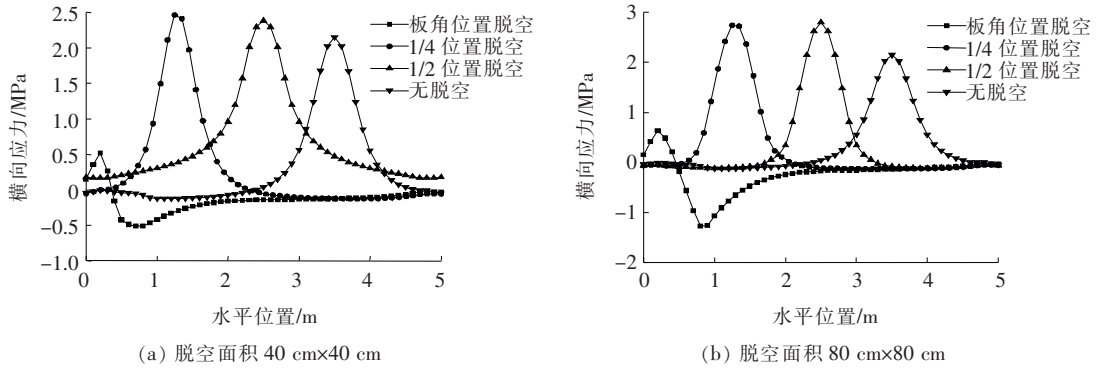


图 13 板底横向应力曲线

底横向拉应力增大；② 远离板角后，脱空位置对横向拉应力的影响较小。由于沿着荷载移动方向的传力杆存在，不同脱空面积的板角脱空均出现了横向拉应力减小，且出现一定长度的压应力区段。对比未脱空时的应力曲线可看出，脱空导致了横向应力峰值的增加，从 40 cm×40 cm 的脱空面积到 80 cm×80 cm 的脱空面积，1/2 及 1/4 位置脱空应力峰值从 2.4 MPa 左右升至 2.9 MPa 附近，相比增加了 20.8%。

5 结论

(1) 在飞机荷载作用下，脱空区板中央均会出现应力集中现象，当脱空发生在板中，板底会出现横向拉应力，当脱空出现在板角，脱空区会出现横向压应力。脱空区域远离板角后会出现比不脱空更大的拉应力值，可能会导致混凝土开裂。

(2) 当机场水泥混凝土道面发生脱空时脱空区域附近应力应变复杂，多会出现应力集中。若不及时处理，脱空继续恶化，随着脱空面积的增大，应力集中现象会进一步恶化。因此，在道面养护过程中应做到及时按时检测，早发现早处理。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 赵鸿铎, 马鲁宽, 唐龙, 等. 基于数据挖掘的民用机场水泥道面维护辅助决策模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(12): 1 676—1 682, 1 753.
- [3] WU Z, ZHANG Z J, ABADIE, C. Determining Structural Strength of Existing Asphalt Layer Using Condition Survey Data[J]. Int. J. Pavement Eng., 2013, 14(7): 603—611.
- [4] FAKHRI Mansour, DEZFOULIAN Reza Shahni. Pavement Structural Evaluation Based on Roughness and Surface Distress Survey Using Neural Network Model[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204 (20): 768—780.
- [5] 凌建明, 朱立国. 高胎压下机场环氧沥青道面结构动力响应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1 538—1 544.
- [6] 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.
- [7] WALTER R B. Nonlinear Finite Element Analysis of Heavily Loaded Airfield Pavement System[C]. Application of the Element Method in Geotechnical Engineering. New York: Elsevier, 1972: 657—693.