

西南某机场沥青道面隆起部位承载力 数值模拟与验证^{*}

陈惊宇¹, 江圣泽², 王蔚然³, 夏登民³

(1.中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307; 2.民航机场建设工程有限公司, 天津 滨海 300456;
3.南京航空航天大学 金城学院, 江苏 南京 211156)

摘要:西南某机场沥青道面出现异常隆起, 探地雷达勘察发现沥青面层与下部碾压混凝土层之间存在约 2 cm 的空洞。为分析隆起部位道面的承载力状况, 根据机场道面结构分别建立正常工作状态和异常隆起状态下沥青道面有限元计算模型, 计算 2 种状态下重锤式弯沉仪(HWD)重锤锤击道面的弯沉值, 并使用 HWD 对隆起部位及正常部位进行实测, 验证有限元模拟计算结果的正确性; 结合模拟仿真弯沉值与实测弯沉值, 使用 TJ-Back 软件分别计算隆起部位和正常部位基顶反应模量。理论计算得正常工作状态下沥青道面荷载中心最大弯沉值为 299.6 μm 、隆起部位荷载中心最大弯沉值为 566.9 μm , HWD 实测正常工作状态下沥青道面荷载中心最大弯沉值为 314.8 μm 、隆起部位荷载中心最大弯沉值为 544.1 μm ; TJ-Back 根据模拟弯沉计算所得正常工作状态和异常隆起状态下沥青道面基顶反应模量分别为 362 MPa、247 MPa, 根据 HWD 实测弯沉计算所得两种状态下基顶反应模量分别为 375 MPa、189 MPa。有限元模拟弯沉盆变化规律与 HWD 实测规律一致, 模拟仿真与实测结果都表明道面隆起部位承载力小于正常部位。

关键词:公路; 沥青路面; 机场道面; 隆起; 承载力; 弯沉

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)05-0067-04

重锤式弯沉仪(HWD)通过重锤对道面的冲击作用模拟飞机对道面的施荷过程, 记录道面在荷载作用下的弯沉响应, 利用荷载值、弯沉变形值反演推算道面的基层顶面反应模量, 评价道面及基础的强度。HWD 属于无损检测, 具有原位检测、速度快、不破坏道面结构、检测后不需要修补等优点, 近年来在机场道面检测、修复等工程中广泛应用。杨俊羽结合华东某机场 HWD 检测数据, 对机场复合道面结构参数反演、CAN-PCN 强度评价、结构剩余寿命、结构适应性厚度等进行了分析。史保华等运用 HWD, 采用承载板法对公路飞机跑道承载力进行现场试验, 发现公路跑道承载力良好, 道面动模量为静模量的 2 倍, HWD 设备的动荷载过程更符合实际情况。国洋建立 HWD 加载模型, 通过正交试验和控制变量试验分析道面弯沉的变化规律。西南某机场道面检测中发现沥青道面存在异常隆起, 为判定隆起部位的承载力, 使用有限元软件根据跑道结

构分别对沥青道面隆起部位和正常部位进行 HWD 落锤冲击仿真模拟, 分析隆起部位弯沉分布规律。

1 有限元模拟仿真

1.1 模型建立

该机场沥青道面结构层为底部 30 cm 级配碎石层+30 cm 碾压混凝土层, 混凝土层上部依次加铺 9 cm AC-20 改性沥青混凝土层+6 cm SMA-16 沥青混凝土层。道面异常隆起高度约 2 cm、宽度为 5 cm, 沿沥青面层下方碾压混凝土施工接缝分布。

根据探地雷达探测结果和异常隆起高度建立图 1 所示三维有限元模型。HWD 落锤直径为 30 cm, 在沥青道面表面划分受压区域用于施加重锤冲击荷载。HWD 落锤冲击荷载有 100 kN、150 kN、200 kN、250 kN 和 300 kN 5 种, 该机场道面隆起部位沥青面层上表面未发生破坏, 选择 200 kN 作为冲击荷载。落锤冲击过程中荷载到达时间取 0.5 s,

^{*} 基金项目: 中国民用航空飞行学院十九大专项基金项目(SJD2018-29); 江苏省高等学校自然科学基金项目(18KJB590003); 四川省大学生创新项目(S202010624048; S201910624131)

荷载作用时间取 0.01 s。

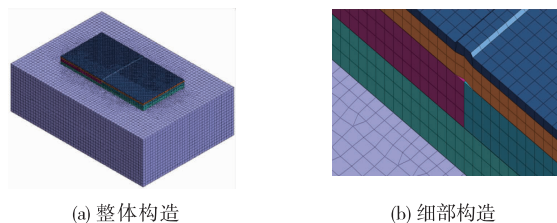


图1 隆起道面模型

表1为沥青道面隆起部位和正常部位各层力学参数取值。正常部位的模型按照结构层实际分布情况创建。考虑计算效率和精度,2种模型中沥青面层、碾压混凝土层和碎石稳定层模型网格划分尺寸取100 mm,土基模型网格划分尺寸取300 mm。模型按照层状理论体系构建,土基部位四周采用无限元边界,底部约束竖向位移。SMA-16改性沥青混凝土层、AC-20沥青混凝土层、碾压混凝土层和底部级配碎石层四周采用自由边界。模型各层之间接触部位采用共享平面,层与层之间连续接触、无摩擦。

表1 模型力学参数

部位	结构分布	弹性模量/MPa	泊松比
隆起部位	SMA-16 改性沥青混凝土	1 000	0.30
	AC-20 沥青混凝土	1 300	0.26
	碾压混凝土	30 000	0.24
	级配碎石	1 600	0.25
	土基	60	0.40
正常部位	SMA-16 改性沥青混凝土	1 200	0.29
	AC-20 沥青混凝土	2 000	0.23
	碾压混凝土	37 000	0.21
	级配碎石	1 600	0.25
	土基	70	0.39

1.2 计算结果

根据 MH/T 5024—2019《民用机场道面评价管理技术规范》,采用 HWD 进行沥青道面参数反演分析时,最远端传感器距离荷载中心 1.8~2.4 m。该机场沥青道面的有效厚度为 15 cm,小于下方水泥混凝土道面层厚度,传感器最远端距离取 1.8 m。表2为 HWD 落锤冲击作用下2种模型各测点感应器模拟计算弯沉值。由表2可知:异常隆起部位荷载中心最大弯沉值为 566.9 μm ,正常道面荷载中心最大弯沉值为 299.6 μm ,隆起部位下方存在脱空导致相同落锤荷载作用下道面弯沉值变大。

表2 各测点模拟计算弯沉

感应器编号	各测点弯沉值/ μm	
	异常部位	正常部位
D1	-155.91	-107.4
D2	-175.33	-120.4
D3	-196.05	-133.4
D4	-216.15	-147.5
D5	-235.14	-159.6
D6	-359.05	-168.9
D7	-566.90	-299.6

图2为异常隆起部位与正常部位模拟弯沉曲线。由图2可知:正常部位与隆起部位弯沉值均在荷载中心最大,并由中心向外逐渐减小。

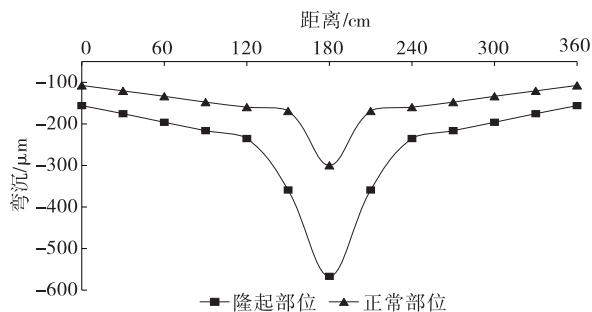


图2 隆起部位及正常部位模拟弯沉曲线

将模拟弯沉值代入民用机场道面结构参数反演分析软件 TJ-Back,计算得到隆起部位和正常部位道面基顶反应模量分别为 247 MPa 和 362 MPa。根据相关研究结果,机场道面基顶反应模量与承载比 CBR 呈正相关,正常部位基顶反应模量大于隆起部位。从模拟结果来看,沥青道面隆起部位的承载力小于正常部位。

2 实测验证

2.1 检测结果

为论证模拟所得弯沉变化规律,对沥青道面进行 HWD 现场弯沉测试。对隆起部位中心进行加载,并在正常道面中选择3个点进行测试,每个测点删除第1锤数据,取第2锤、第3锤的平均值作为测试结果。HWD 加载质量 32 t,传感器7个,检测时根据道面结构厚度调整加载质量,确保承载板中心点的弯沉值达到 110 μm 。

表3、表4分别为 200 kN 重锤荷载作用下沥青道面正常部位和隆起部位各感应器测试弯沉值。从表3可以看出:测点2荷载中心弯沉均值最大,为 319.90 μm ;测点1荷载中心弯沉均值最小,为

307.15 μm ;3 个测点荷载中心弯沉均值为 314.8 μm 。 μm ,最小为 542.70 μm ,均值为 544.10 μm ,远大于
由表 4 可知:荷载中心最大弯沉值为 545.50 正常部位各测点的弯沉值。

表 3 沥青道面正常部位弯沉测试结果

测点号	锤击次数	荷载/kN	各感应器测试弯沉/ μm						
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	第 2 锤	196.19	308.20	229.60	209.90	190.30	169.10	151.40	130.70
	第 3 锤	195.93	306.10	229.30	209.90	190.40	168.80	151.10	131.70
	均值	196.06	307.15	229.45	209.90	190.35	168.95	151.25	131.20
2	第 2 锤	197.13	323.40	116.20	102.60	91.10	82.50	72.00	64.20
	第 3 锤	197.43	316.40	116.10	102.50	91.00	81.70	72.10	64.10
	均值	197.28	319.90	116.15	102.55	91.05	82.10	72.05	64.15
3	第 2 锤	197.02	321.60	139.70	128.90	113.60	99.20	86.50	76.00
	第 3 锤	196.82	313.30	140.10	128.30	113.30	99.20	86.50	75.90
	均值	196.92	317.45	139.90	128.60	113.45	99.20	86.50	75.95

表 4 沥青道面隆起部位弯沉测试结果

锤击次数	荷载/kN	各感应器测试弯沉/ μm						
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
第 2 锤	193.36	545.50	399.40	316.90	272.80	238.50	207.60	178.40
第 3 锤	193.36	542.70	399.10	316.80	273.40	237.30	206.40	178.30
均值	193.36	544.10	399.25	316.85	273.10	237.90	207.00	178.35

2.2 对比分析

图 3 为 HWD 重锤作用下沥青道面隆起部位与正常部位实测弯沉曲线。各部位弯沉值均由中心位置向外逐渐减小,隆起部位荷载中心弯沉值下沉趋势大于正常部位,变化规律与有限元模拟结果一致。

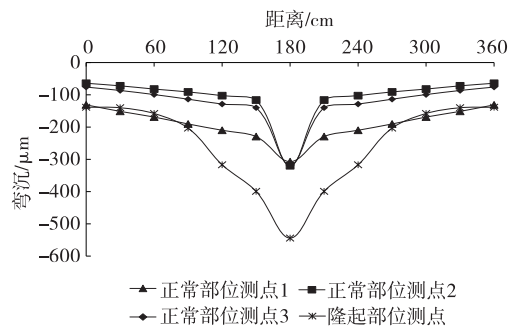


图 3 正常部位及隆起部位沥青道面实测弯沉曲线

图 4、图 5 分别为沥青道面正常部位、隆起部位实测和模拟弯沉分布。正常部位 3 个测点所得荷载中心最大弯沉值与模拟结果相差 2.5%、6.8%、6.0%,隆起部位荷载中心最大弯沉值与模拟结果相差 4.2%,荷载中心最大实测弯沉值与有限元模拟结果相差较小,两种方法所得弯沉变化规律一致。

将各测点实测弯沉值代入 TJ-Back,计算得隆

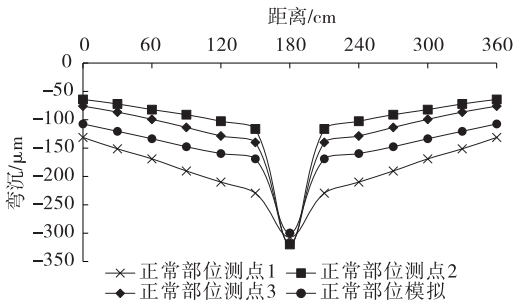


图 4 正常部位实测和模拟弯沉曲线

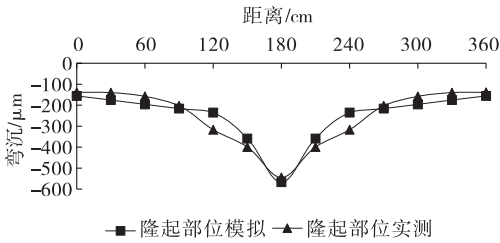


图 5 隆起部位实测和模拟弯沉曲线

起部位和正常部位基顶反应模量分别为 189 MPa 和 375 MPa,正常部位模量大于隆起部位,实测弯沉反演道面结构参数大小与模拟结果一致。

3 结论

(1) 对于沥青道面正常部位,3 个测点荷载中

心最大实测弯沉值分别为 307.15 μm 、319.90 μm 、317.45 μm ，模拟所得荷载中心最大弯沉值为 299.6 μm ，实测值与模拟值相差 2.5%、6.8%、6.0%。对于沥青道面隆起部位，荷载中心最大实测弯沉值为 544.10 μm ，最大模拟弯沉值为 566.90 μm ，两者相差 4.0%。两种方法所得结果相差较小，模拟与实测所得正常部位沥青道面弯沉分布规律一致。

(2) 将模拟值代入道面结构参数反演分析软件 TJ-Back，计算得沥青道面隆起部位和正常部位基顶反应模量分别为 247 MPa 和 362 MPa。将 HWD 实测值代入 TJ-Back，计算得隆起部位和正常部位基顶反应模量分别为 189 MPa 和 375 MPa。模拟结果与实测结果都表明道面隆起部位承载力小于正常部位。

(3) 根据理论与实测分析结果，道面隆起部位荷载中心弯沉值大于正常部位弯沉值。隆起部位弯沉盆下沉趋势比正常部位明显，其下方出现明显脱空。

参考文献：

- [1] 杨俊羽.机场复合道面结构性能综合评价[J].西部交通科技,2011(10):70-75+85.
- [2] 史保华,操兵,张亚瑞,等.基于重落锤式弯沉仪法(HWD)的公路飞机跑道沥青道面承载能力测试分析[J].科学技术与工程,2015,15(20):134-140.
- [3] 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.
- [4] WESOŁOWSKI M, IWANOWSKI P. APCI evaluation method for cement concrete airport pavements in the scope of air operation safety and air transport participants life[J]. International Journal of Environment Research and Public Health, 2020, 17(5): 1663.
- [5] 张杨.基于 Winkler 地基下机场道面弯沉曲线快速反演研究[D].天津:中国民航大学,2020.
- [6] 雷亚伟,程国勇,郭稳厚.HWD 测试方法的可靠性分析[J].中外公路,2016,36(1):57-62.
- [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] 邱欣,杨青,游庆龙.基于 FWD 动态弯沉盆参数的沥青路面模量反演分析[J].长安大学学报(自然科学版),2013,33(6):42-48.
- [9] GOKTEPE A B, AGAR E, LAV A H. Advances in back-calculating the mechanical properties of flexible pavements[J]. Advances in Engineering Software, 2006, 37(7): 421-431.
- [10] 谢春庆,李天华,徐鸿彪.某机场道面脱空原因与处治措施[J].路基工程,2012(1):181-184+187.
- [11] 游庆龙,李京洲,罗志刚,等.飞机轮载作用下机场复合式道面结构力学分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2020,41(1):111-117.
- [12] 江圣泽,方学东,盛昀,等.主起落架作用下的机场土面区承载力分析[J].交通科技与经济,2021,23(4):45-50.
- [13] 游庆龙,凌建明,袁捷,等.适应大型飞机的沥青道面结构有限元模型[J].交通运输工程学报,2012,12(2):18-23.
- [14] 张梦.落锤冲击荷载作用下地基承载力检测的数值模拟分析[D].北京:北京交通大学,2016.
- [15] 江圣泽,盛昀,汪家浩,等.机场土质区动态模量 PFWD 检测中开挖面积影响分析[J].公路与汽运,2021(5):49-52+58.

收稿日期:2021-11-07

《中外公路》2023 年征订通知

《中外公路》(原《国外公路》)创刊于 1980 年,双月刊,由长沙理工大学主管、主办。邮局公开发行至全国公路、市政、铁路、水利、建筑等系统和相关行业,发行量大,影响面广。属 RCCSE 中国核心学术期刊、首届(2006 年)中国高校特色科技期刊、中国高校技术类优秀期刊、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊,由中国科学技术信息研究所组织评选)、湖南省十佳科技期刊、中国期刊全文数据库及中国核心期刊(遴选)数据库全文收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,“桥梁工程与隧道工程”栏目荣获首届(2008 年)湖南省优秀栏目,2009 年获全国高校科技期刊优秀编辑质量奖,多次被评为交通部、湖南省优秀期刊。

2023 年《中外公路》为大 16 开,页码 256 页以上,每册定价 15.00 元,全年 6 期共 90.00 元。

邮发代号:42-63。读者也可通过邮局或银行汇款至杂志社直接订阅。

地址:长沙理工大学云塘校区 58 号信箱

邮编:410114

收款单位:《中外公路》编辑部

户名:长沙理工大学

账号:18051401040000158

开户行:长沙市农行高云支行

电话:0731-85258033(带传真)

联系人:白雪

E-mail: zhongwaigonglu@vip.163.com