

民用机场土质区密实度快速检测研究

——以广汉机场为例

盛 昀¹, 江圣泽², 吴雨桐¹

(1. 中国民用航空飞行学院 机场学院, 四川 广汉 618307; 2. 民航机场建设工程有限公司, 天津 300456)

摘要:为了探究使用 PFWD 在民用机场土质区检测密实度的方法,达到快速检测密实度的目的,根据机场土质区的特点,以广汉机场作为试验场地,结合 PFWD 对机场土质区填料的动态弹性模量与密实度之间关系进行探究。建立三维有限元模型计算土质区填料不同模量下的力学响应;使用传统方法对 PFWD 现场测试结果进行验证。研究表明,PFWD 测试结果与传统方法实测密实度所得结果之间的相差比较小,PFWD 可用于广汉机场土质区密实度快速检测。

关键词:机场;土质区;PFWD;密实度

中图分类号:TU279.7+1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)01-0345-05

民用机场土质区是保证飞机冲/偏出跑道后减少飞机损伤的区域^[1]。为了保证土质区的承载力,机场每年都应进行密实度检测^[2]。现有规范中要求的土质区密实度检测方法以传统的破损方法为主,检测时一般要求在设计高程下方 30 cm 处进行取样^[3],从各个地区民用机场检测情况来看,由填料开挖取样至得出最终检测结果需要花费大量的时间,检测效率低下,不利于快速得出结论以及民航监察员现场监管。现有的无损检测方法中,核子密度仪和无核密度仪属于快速检测土体密实度的方法。机场土质区通常填筑的填料为土料、石料、土石混合料 3 种,由于探测钢针无法插进石料填筑的土质区,因此无法准确得出此种填料填筑测试区域的密实度值,这两种检测仪器依旧存在适用性不足的缺点。文献[4]指出使用神经网络法预测土质区密实度。该方法优点在于节省了大量体力劳动成本,缺点是对于新修建的机场需要经过积累数年的实测土质区密实度数据才可使用该方法进行分析。因此这种方法存在进一步改进优化的空间。结合民用机场实际的运行状况和监管需求,有必要探索一种快速、准确、低成本的密实度检测方法。

PFWD 便携式落锤弯沉仪是一款测试土基动

态弹性模量的无损检测设备^[5],使用时只需提升落锤至一定高度,然后释放使得落锤冲击承载板得出被测土体的动态弹性模量(E_{vd})^[6-7]。研究表明,PFWD 所测 E_{vd} 与测试土体密实度、静弹性模量值、含水率等相关具有良好的相关关系^[8-9]。因此,可结合机场土质区特点探究基于 PFWD 的密实度检测方法。

1 工程概况

1.1 土质区填料情况

广汉机场是中国民航飞行学院广汉分校的训练机场,机场跑道长 2 200 m,宽 45 m,飞行区等级 4C,按照民用运输机场飞行区标准修建,为 A1 类通用机场,可起降塞斯纳、新舟 60 等训练类机型^[10]。对广汉机场土质区填料取样进行颗粒筛分实验(图 1),填料的不均匀系数为 13.8,曲率系数为 1.29 在 1~3 之间。从数值分布来看填料级配良好。从各粒径占比来看,该填料为以黏性为主的土石混合料。由重型击实试验得到填料的最佳含水率为 15.2%,最大干密度为 1.88 g/cm³

1.2 土质区密实度检测管理现状

广汉机场报送四川监管局的机场管理手册规定:机场科场务队每年对广汉机场升降带进行全面碾压工作,每年对机场升降带密实度进行测试工

收稿日期:2021-08-31

基金项目:中国民用航空飞行学院青年基金项目(QJ2021-075)。

作者简介:盛昀(1994—),男,江苏扬州人,中国民用航空飞行学院,助教,硕士,研究方向为机场工程;通信作者江圣泽(1994—),男,江苏南通人,民航机场建设工程有限公司,助理工程师,硕士,研究方向为机场工程。

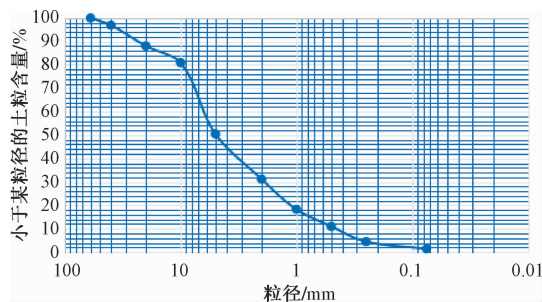


图 1 广汉机场填料粒径分布曲线

作,密实度应当达到 66% 以上。目前,机场每年土质区密实度检测现有规范规定传统方法,试验时分别检测填料的实际干密度和标准最大干密度,并依据式(1)计算得到密实度^[11]为

$$K = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100\% \tag{1}$$

式中: K 为密实度; ρ_d 为实际干密度, g/cm^3 ; ρ_{dmax} 为最大干密度, g/cm^3 。

从实际情况来看,检测实际干密度的环刀法存在取样时间长、工作效率低等缺点。填料最大干密度需要由重型击实实验得出,但结合每年测试土质区密实度的次数,机场并无必要配备重型击实仪和烘箱等专业设备,只能依托外界专业机构进行检测。

2 试验方案

与公路路基不同,机场土质区密实度检测需要在设计高程下 30 cm 进行取样,使用 PFWD 检测动态弹性模量时需要将仪器放置在试坑中。研究表明,PFWD 检测时在水平方向产生的冲击影响范围为承载板直径的 2.5 倍^[12],为得到准确的模量值必须考虑开挖试坑坑壁对仪器测试过程中的影响。在广汉机场土质区分别开挖深度 30 cm,面积分别为 30 cm×30 cm、45 cm×45 cm、60 cm×60 cm、75 cm×75 cm 和 90 cm×90 cm 的试坑,使用承载板直径为 30 cm 的 PFWD 实测 5 个不同面积试坑底部填料的动态模量值,探究不同面积下土质区填料模量的变化规律,确定 PFWD 测试时的开挖面积,消除试坑壁对测试结果的影响。

土体填料处于不同夯实状态下的模量值与对应密实度值具有一定的相关关系。在广汉机场土质区中选择合适的填料场地,对开挖相应面积的试坑中对设计高程下 30 cm 处的填料进行夯击并测试不同夯实状态下的模量值、弯沉值以及对应的密实度值。使用最小二乘法对实测数据进行拟合,确定两者关系曲线,探究土质区填料动态弹性模量与密

实度关系。

土质区密实度检测的根本目的是为了保证土体的承载力。PFWD 所测模量是反映承载力的重要力学指标。文献[13]使用有限元计算了不同模量变化过程中机场土质区填料承载力的变化,故由曲线关系分别计算土质区填料密实度为 66% 和 70% 对应模量下飞机主起落架作用时的承载力变化,对 PFWD 所测模量与填料承载力之间的变化规律进行探究。

根据《民用机场飞行区场地维护技术指南》取点方式在 13 号跑道北侧升降带使用 PFWD 进行实测。将测试所得模量值代入关系曲线计算并与传统方法测试结果进行对比,验证关系曲线,进一步论证 PFWD 检测土质区密实度准确性和可靠性。

3 数据分析

3.1 不同面积试坑模量变化规律

在广汉机场升降带内开挖 5 个面积不同、深度为 30 cm 的试坑(图 2),保证相同密实度的条件下 PFWD 检测填料的动态模量。表 1、图 3 为 5 个不同面积试坑的实测结果,当广汉机场填料开挖的正方形试坑边长为 30 cm 时,模量平均值为 65 MPa;边长为 45 cm 时,模量平均值约为 55 MPa;边长为 60 cm 时,模量平均值约为 53 MPa;边长为 75 cm 时,模量平均值约为 53 MPa;边长为 90 cm 时,模量平均值约为 53 MPa。模量代表值随着面积的增大而减小,试坑边长为承载板直径的 2.5 倍时,模量代表值与 3 倍承载板直径边长结果相同。由于 2.5 倍直径时的坑壁对测试结果不会产生影响,故 PFWD 在机场土质区检测密实度时试坑的开挖面积取 75 cm×75 cm。



图 2 开挖试坑示意图

表 1 土质区不同面积试坑填料模量测试结果

组次	面积				
	30 cm×	45 cm×	60 cm×	75 cm×	90 cm×
	30 cm	45 cm	60 cm	75 cm	90 cm
1	66	54	54	53	52
2	61	55	53	54	50
3	53	54	54	47	49
4	73	57	52	58	56
5	74	56	53	54	58

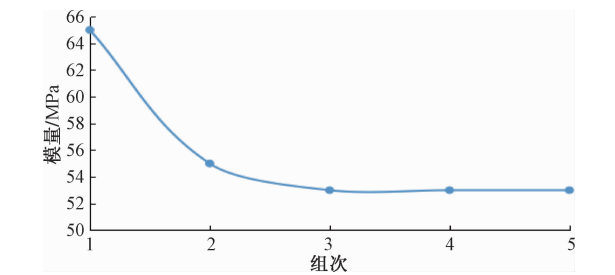


图 3 土质区不同面积试坑填料模量变化规律

3.2 动态模量与密实度关系

开挖相应面积的试坑,使用特制的钢筋混凝土夯具对填料进行夯击并进行动态弹性模量测试。每组完成 PFWD 测试后,取样进行密实度测试。图 4 为土质区填料不同夯实状态下动态弹性模量与密实度拟合曲线,图中的相关系数为 0.995,对数函数的表达式为

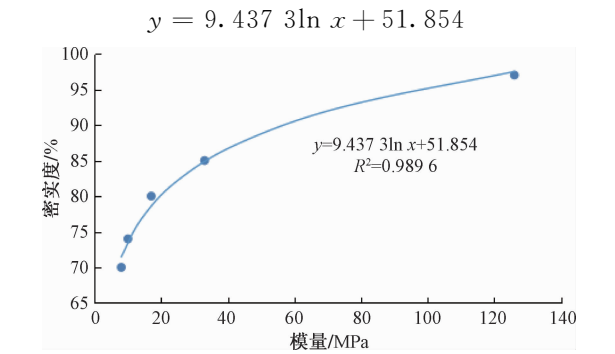


图 4 土质区填料模量与密实度拟合曲线

现场测得的模量与密实度相关度最优曲线为对数函数曲线,模量与密实度间的关系为正相关,随着填料被不断的压实,其模量值与对应密实度值在不断增大。

3.3 不同模量承载力计算分析

为了进一步分析广汉机场土质区不同弹性模量下荷载作用的力学响应,验证 PFWD 在检测密实度过程中反映出的承载力变化,假设新舟 60 在训练中冲出跑道,主起落架直接划开设计高程下 200 mm 范围以内的根植土层并直接冲击下方的填

料,模拟最不利荷载条件下土质区的受力情况。

设置模型尺寸为 10 m×5 m×3 m 长方体模块,分别假设飞机在滑行和着陆阶段冲出跑道,新舟 60 的最大起飞重量和最大着陆重量分别为 218 kN 和 216 kN,单轮荷载约为 51.8 kN 和 51.3 kN,轮印面积为 102 400 cm² 和 99 225 cm²。考虑到网格数量与计算成本^[14-16],轮印区的网格播种尺寸为 0.1 m,其余部位尺寸为 0.2 m,总体模型示意图如图 5 所示。

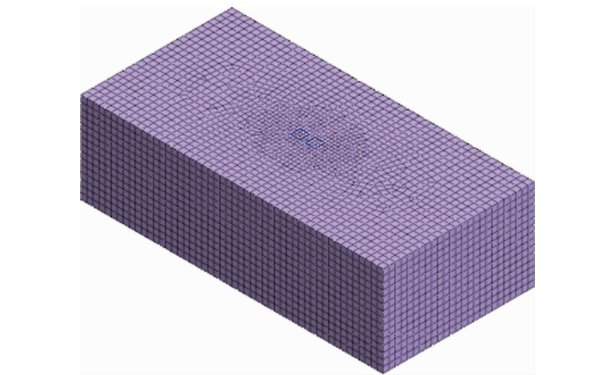


图 5 土质区计算模型示意图

由于广汉机场为训练专用的通用机场,根据现有机场管理手册和实际密实度检测情况,分别计算填料密实度为 66% 和 70% 时对应的力学响应。根据图 3 探究所得的拟合曲线和《工程地质手册》^[17]以及前文运用的土体动、静弹性模量之间的关系,具体模型参数取值见表 2。

表 2 广汉机场土体参数取值

密实度/%	静态弹性模量/MPa	容重/(kN/m ³)	泊松比	剪切角/(°)	黏聚力/(kN/m ²)
66	4	19	0.21	14	32
70	6	20	0.2	15	35

填料密实度在 66% 和 70% 两种状态下时,两种荷载作用产生的最大竖向位移见表 3。

表 3 两种荷载作用下各阶段最大变形

密实度/%	滑行阶段位移/cm	着陆阶段位移/cm
66	4.80	4.48
70	3.21	3.20

由于滑行阶段的最大起飞重量大于着陆时的最大着陆重量,所以滑行过程中在主起落架的冲击位移要大于着陆时的冲击位移。土体密实度处于 66% 时滑行阶段的变形比着陆阶段要大 7.1%, 70% 时滑行阶段与着陆阶段位移相近。有限元模

拟的填料位于广汉机场土质区覆盖 200 mm 根植土深度的下方区域,将各阶段产生的变形值加上穿过的原植被土厚度,滑行阶段造成设计高程以下的变形值分别为 24.80 cm 和 23.21 cm,着陆阶段造成设计高程以下的变形值为 24.48 cm 和 23.20 cm。随着模量值的增大,起落架作用产生的位移减小。PFWD 检测密实时可反映出机场土质区填料的承载力变化。

3.4 曲线关系验证

对所得填料模量与密实度曲线公式进行验证。经过与机场塔台申请,在指定区域按照规范要求进行验证试验。实测及计算密实度值见表 4。

表 4 实测及计算密实度值

序号	实测模量/MPa	实测密实度/%	计算密实度/%	误差/%
1	23	79.3	81.4	2.6
2	15	77.7	77.4	0.4
3	10	71.3	73.6	3.2
4	10	73.4	73.6	0.3
5	9	72.9	72.6	0.4
6	8	71.4	71.5	0.1
7	7	70	70.2	0.3
8	10	72.3	73.6	1.8
9	12	75	75.2	0.4

开挖边长为 2.5 倍承载板直径,深度 30 cm 的试坑,将 PFWD 放置试坑中央后提升落锤至顶端进行动态弹性模量测试。将整理得到的各个试点动态弹性模量取值代入机场土质区模量与密实度关系曲线计算密实度值。以传统法实测密实度为基准,将所得计算结果与之进行对比,相差比最大约为 3.2%,最小约为 0.1%,平均相差比约为 1%,在合理范围内(表 4)。根据广汉机场目前的机场手册规定:机场科场务队每年对广汉机场升降带进行全面碾压工作,每年应对机场升降带密实度进行测试工作,密实度应当达到 66% 以上。从 PFWD 和传统法的检测结果来看,测区密实度均在 66% 以上,检测结果合格。

从计算误差值来看,计算与实测的密实度结果的相差较小,图 6 为理论计算结果与实测结果相关关系,相关系数 0.956,曲线公式为

$$K_{理} = 1.036\ 9K_{实} - 2.061\ 9$$

实测数据与理论计算数据的相关系数为 0.956,相关系数表示两组数据间具有良好的相关关系,进一步说明现场试验得到的机场土质区填料拟合曲线能够用于测算密实度值。

由基于 PFWD 得到的广汉机场土质区填料密

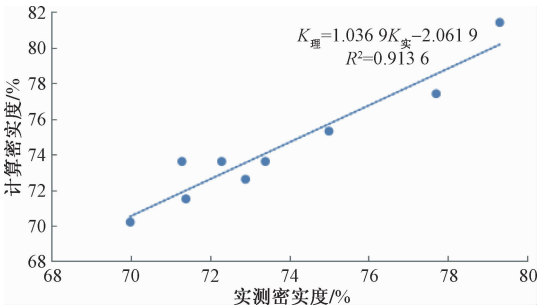


图 6 实测及计算密实度相关分析

实度与模量之间关系分布规律来看,检测时还可将密实度控制标准值对应的动态弹性模量作为评判值,直接通过比对各个测点的实测模量值与评判值大小,判断密实度值是否合格。

4 结论

民用机场土质区是飞行区的重要组成部分,为了日后达到土质区密实度快速检测的目的,使用 PFWD 便携落锤弯沉仪在广汉机场开展相关研究,结论如下:

1)通过测量广汉机场土质区开挖 30 cm 深度,面积分别为 30 cm×30 cm、45 cm×45 cm、60 cm×60 cm、75 cm×75 cm 和 90 cm×90 cm 的试坑模量,根据模量变化规律进一步论证了 PFWD 在机场土质区检测模量时所需开挖正方形边长为承载板直径的 2.5 倍。

2)通过试验分析,发现广汉机场土质区模量与密实度呈对数函数曲线关系,曲线的相关系数较高。随着模量的增大,土质区填料的密实度也在增大,模量密实度之间的变化规律为正相关。

3)PFWD 所测模量可以反映土质区填料承载力变化。土体强度随着密实度增加而增加,将各阶段产生的变形值加上穿过的原根植土厚度,滑行阶段造成设计高程以下的变形值分别为 24.80 cm 和 23.21 cm,着陆阶段造成设计高程以下的变形值为 24.48 cm 和 23.20 cm。随着模量值的增大,起落架作用产生的位移减小。PFWD 检测密实时可反映出机场土质区填料的承载力变化。

4)使用 PFWD 检测时只需开挖边长为 2.5 倍承载板直径,深度 30 cm 的试坑,将 PFWD 放于试坑内中心位置进行落锤冲击试验获取填料动态弹性模量值。通过现场取点测试,发现由广汉机场土质区填料模量与密实度关系曲线计算得出的理论密实度计算结果与传统方法所得结果的误差比较小。理论计算结果与传统法所得结果之间的相关

系数较高,PFWD 可用于民用机场土质区密实度快速检测。检测时根据所得曲线关系由动态弹性模量值推算密实度值,亦可将广汉机场土质区密实度控制标准值对应的动态弹性模量作为评判值,现场直接通过比对各个测点的实测模量值与评判值大小,判断测区密实度是否合格。

参考文献

[1] 中华人民共和国行业标准,民用机场飞行区技术标准:MH-5001—2013[S]. 中国民用航空局,2013.

[2] 中国民用航空局. 民用机场飞行区场地维护技术指南[S]. 北京:中国民用航空局,2010.

[3] 中国民用航空局. 运输机场运行安全管理规定:CCAR-140-R1[S]. 北京:中国民用航空局,2019.

[4] 刘国光,裴磊洋,杨跃敏,等. 基于人工神经网络的机场土面区压实度预测[J]. 深圳大学学报(理工版), 2021, 38(1):54-60.

[5] 李跃军. 路基强度的快速无损检测评价与控制研究[D]. 长沙:中南大学,2011.

[6] 马超. 高速公路特殊土路基回弹模量现场快速研究[J]. 中国新技术新产品, 2018(8):118-119.

[7] KAVUSSI A,RAFIEI K,YASROBI S. Evaluation of PFWD as potential quality control Tool of pavement layers

[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2010, 16(1):123-129.

[8] 张军辉,邓宗煌,刘杰,等. 南方湿热地区既有路基快速检测方法研究[J]. 中外公路, 2019, 39(6):6-10.

[9] RAO C N,GEORGE V,SHIVASHANKAR R. PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2009, 10(3):189-199.

[10] 尹向东. 机场跑道水泥道面加铺沥青混凝土防反射裂缝方法概论[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(5):238-240.

[11] 中华人民共和国行业标准,公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S]. 中华人民共和国交通运输部, 2021.

[12] 周文. PFWD 测试工作特性仿真研究[J]. 公路工程, 2009, 34(6):112-117.

[13] 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.

[14] 王金艳,王珊珊. midas GTS NX 常见问题解答[M]. 北京:人民交通出版社, 2019:121-122.

[15] 密路祥,徐立军,胡兵. 基于 Fluent 的水电解槽电场数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21):8883-8888.

[16] 朱春风,艾化学,肖波,等. 连续曲线钢箱梁荷载试验及有限元分析[J]. 科技和产业, 2021, 21(7):223-228.

[17] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1992.

Study on Fast Detection of Soil Compactness in Civil Airport:

Taking Guanghan Airport as an example

SHENG Yun¹, JANG Shengze², WU Yutong¹

(1. School of Airport, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China;
2. Airport Construction Engineering Corporation Limited, Tianjin 300456, China)

Abstract: To explore the method of using PFWD to detect the compactness in the airport soil area, and achieve the purpose of fast detection of compactness, according to the characteristics of the airport soil area, Guanghan Airport was taken as the test site, and the relationship between the dynamic elastic modulus and the compactness of the filler in the airport soil area was explored combined with PFWD. A three-dimensional finite element model was established to calculate the mechanical response of fillers under different moduli. The PFWD field test results were verified by using traditional methods. The results show that the difference between PFWD test results and those of traditional method was relatively small, and PFWD can be used for the rapid detection of soil density in Guanghan airport.

Keywords: airport; soil area; PFWD; compactness