

# 机场水泥混凝土道面实测弯沉值的温度影响分析

吴文亮<sup>1</sup>, 赵为天<sup>1</sup>, 熊春龙<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司)

**摘要:**为探究机场道面温度状况对实测弯沉值影响的规律,现场测试获得了机场水泥混凝土道面在不同温度下的动态弯沉值。对板中、板边、板角实测动态弯沉值与温度的关系进行了探究,分析了落锤式弯沉仪(FWD)在受温度影响发生变形的道面板上不同放置位置对实测弯沉值的影响,同时研究了机场水泥混凝土道面板的脱空判定与温度的关系。研究结果表明:随着温度升高,板中弯沉值逐渐增大,板边、板角弯沉值逐渐减小,板中、板边、板角弯沉值受温度影响程度逐渐增加;FWD测量位置与所处道面板变形情况不合理将导致弯沉值失真;测试道面板中、板边弯沉可通过线性回归进行温度修正,板角弯沉可通过二项回归进行温度修正,基于道面板温度梯度的弯沉温度修正关系相关性和应用性更好;脱空判定值受温度影响较大,不同时间不同温度情况将出现相悖的判定结果,进行脱空判定时,有必要对脱空判定值进行温度修正。

**关键词:**水泥混凝土道面; FWD; 温度; 弯沉; 脱空

落锤式弯沉仪(FWD)是20世纪70年代末开发的道路无损检测设备,对于机场水泥混凝土道面,通常使用FWD测量弯沉。FWD通过作用在承载板上的落锤向路面施加脉冲荷载,根据测得的弯沉及弯沉盆对路面结构性能进行评价。受机场测试条件和测试手段限制,当前国内外在温度对水泥混凝土道面弯沉值影响方面的研究并不多,且现行规范也没有明确FWD弯沉测试的准确位置以及测试时的温度对弯沉值的影响,不同温度时水泥混凝土脱空判定变化规律的研究也相对较少。华南地区地处亚热带季风气候区,昼夜温差变化较大,受温度影响,道面弯沉值会随之发生变化。为探究道面弯沉值受温度影响的具体变化规律,该文分析华南地区某机场西跑道道面在不同温度下的实测弯沉盆数据,探究在温度变化影响下水泥混凝土道面实测弯沉值的变化规律以及伴生的脱空判定变化规律,为水泥混凝土道面弯沉的合理测试及脱空判定提供参考。

时冲击作用。荷载通过一定重量的落锤从给定的高度落下引起,并可以通过橡胶减震器调节脉冲持续时间。荷载由承载板传递给道面结构,这样测量得到道面因荷载作用产生的竖向变形,即弯沉。

在华南某机场西跑道选取1段水泥混凝土道面,长约20 m,机场道面结构见图1,在不同时间段即不同温度下分别对板中、板边、板角进行弯沉测试。现场弯沉测试采用的设备为PRI 2100 FWD,承载板直径为30 cm,测试荷载级位为140 kN,共布设9个传感器,传感器具体布置如图2所示。

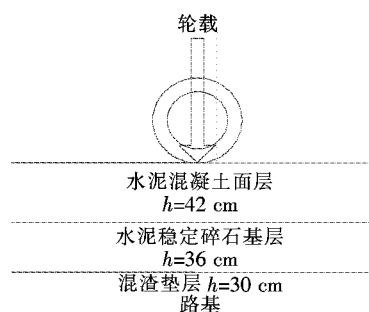


图1 机场道面结构图

## 1 方法和设备说明

FWD弯沉测量方法是基于由落锤引起的道面响应的测量和确定,落锤可模拟由飞机对道面施加的瞬

图2中D1为荷载中心弯沉值;D7为距承载板中心1500 mm处的传感器弯沉值,表征路基状况;D1—D5为距承载板中心900 mm处的弯沉值和中心弯

收稿日期:2020-01-10(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51378223)

作者简介:吴文亮,男,博士,副教授。E-mail:ctwlwu@scut.edu.cn

沉值之差,表征底基层状况。

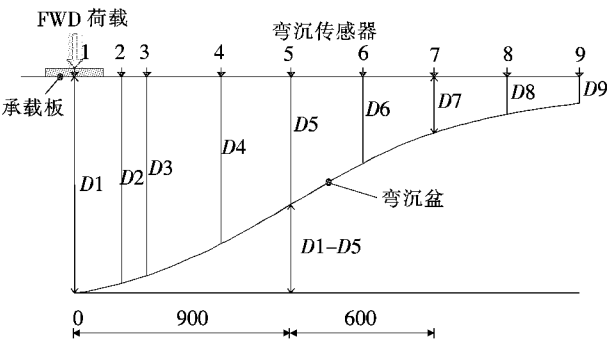


图 2 传感器布置图(单位:mm)

2 弯沉盆的温度影响分析

2.1 测试温度影响

为获得机场道面弯沉在温度影响下的变化规律,通常需要得知道面实测弯沉盆所处的道面板具体温度梯度情况,但受机场道面现场测试条件限制,无法在水泥混凝土道面内部埋设温度传感器获取道面板内部温度情况,因此通过道面弯沉随道面板表面温度变化情况来判断道面板所处温度梯度。测试结果如图 3 所示。

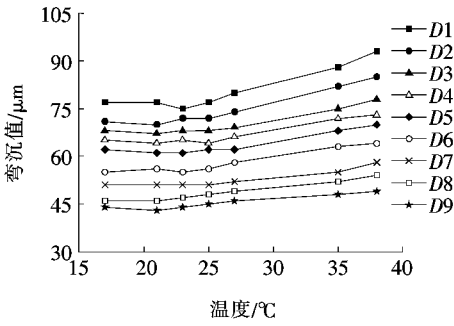
由图 3 可以看出:

(1) 在检测时间段内,道面板表面温度处于 25℃ 时,道面板温度梯度接近于零,道面板表面温度为 17~25℃ 时,道面板处于负温度梯度,道面板表面温度为 25~38℃ 时,道面板处于正温度梯度。其中 17℃ 时负温度梯度最大,38℃ 时正温度梯度最大。

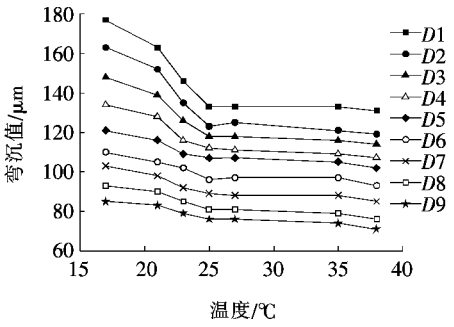
(2) 道面板处于负温度梯度时,板中弯沉值较小,且板中弯沉值变化幅度几乎为零,稳定在一个固定的弯沉值水平。但从道面板表面温度上升至 25℃ 即道面板处于零或正温度梯度开始,板中弯沉值随温度升高逐渐增大。

(3) 与板中弯沉值相反,板边弯沉值在道面处于负温度梯度时处于较高水平,随着道面板表面温度的上升,板边弯沉值逐渐降低,到道面板表面温度上升至 25℃,道面板处于零或正温度梯度时,板边弯沉值最终稳定在一固定水平上。

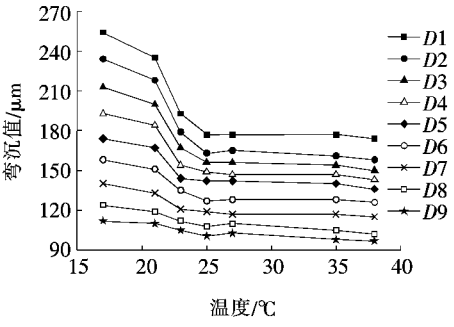
(4) 板角弯沉值随道面板表面温度的变化规律与板边弯沉值一致。在道面板处于正温度梯度时相对稳定,随着温度下降至 25℃,道面板处于负温度梯度时,板角弯沉值开始骤降。不同的是,板角弯沉值较同期板边弯沉值大 30%~45%,且板角弯沉值随温度的变化规律更剧烈(表 1、2)。



(a) 板中弯沉值



(b) 板边弯沉值



(c) 板角弯沉值

图 3 不同温度状况时的代表性弯沉

表 1 道面板板中、板边、板角弯沉值变异系数

传感器编号	弯沉变异系数		
	板中	板边	板角
D1	0.17	0.12	0.17
D2	0.16	0.13	0.17
D3	0.14	0.11	0.15
D4	0.12	0.09	0.13
D5	0.10	0.06	0.10
D6	0.10	0.06	0.10
D7	0.07	0.07	0.08
D8	0.06	0.07	0.07
D9	0.05	0.06	0.06

表 2 道面板板中、板边、板角弯沉值随温度升高(17~38 ℃)的变化幅度

位置	各监测点弯沉变化幅度/%								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
板中	21	21	15	13	14	16	13	15	11
板边	-26	-27	-23	-20	-16	-15	-18	-19	-16
板角	-32	-32	-30	-26	-22	-20	-18	-18	-14

从图 3 及表 1 可以看出:板中、板边、板角的弯沉值离散程度均与距承载板中心的距离呈正相关,距承载板中心越远,弯沉值的变异系数越小,即受温度影响越小。离承载板中心越近,弯沉值越大,变异系数越大,可以看出其受温度影响越明显。同时,板中、板边和板角弯沉值均在道面板表面温度高于或低于 25 ℃ 时发生剧烈变化,由此可看出,在检测时间段内,道面板表面温度 25 ℃ 是一个重要的温度节点。

由表 2 可以发现:板中、板边、板角弯沉值受温度影响程度逐渐增加,板中弯沉值随温度升高而增大,增加幅度为 11%~21%,板边、板角弯沉值皆随温度升高而减小,幅度分别为 15%~27%和 14%~32%;同时,随着距承载板中心距离的增加,各传感器弯沉值随温度升高变化幅度大小总体呈递减趋势。

板中、板边、板角弯沉值之所以会随着温度的变化出现不同的变化规律,其影响机理主要是:白天日照强烈时,道面板表面温度要高于道面板底温度,道面板处于正温度梯度,此时道面板会略微拱胀,道面板局部与基层不再接触,从而在板底形成暂时性的脱空,测得的中心弯沉值也会因此增大,又由于道面板的拱胀,道面板板缝间隙减小,牵制了道面板的翘曲,所以此时测得的道面板边、板角弯沉值较小。而在夜间时,道面板表面温度要低于道面板底温度,道面板处于负温度梯度,因此道面板周边发生翘曲,此时测得的板边、板角弯沉就会偏大,而此时道面板板中处紧贴基层,所以测得的板中弯沉值不会有较为明显的变化。

2.2 测试位置影响

由上可知,随着温度的变化,即道面板处于正或负温度梯度时,道面板会发生变形,由此对道面板实测弯沉值产生影响。因此,FWD 在道面板上的测量位置也尤为重要,通常来说,FWD 承载板不应该放在混凝土板的几何中心,而应该是将 FWD 整体放置在被测板块的中心区域,这样承载板和最后一个传感器都距离接缝至少 0.5 m,避免了最边缘传感器弯沉值数据失真。需要注意的是,如果 FWD 弯沉测量结果被用于

计算每个结构层的弹性模量,承载板和测试梁需放在没有任何裂缝和接缝的道面板上。承载板放置位置的影响见图 4~6。

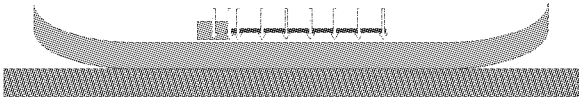


图 4 放置在道面板中心区域的 FWD—负温度梯度

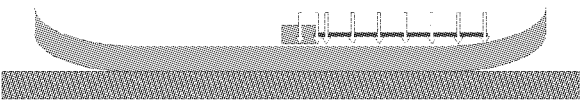


图 5 承载板放置在道面板几何中心的 FWD—负温度梯度

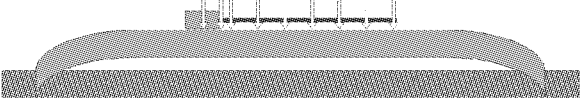


图 6 放置在道面板中心区域的 FWD—正温度梯度

从图 4~6 可见:道面板处于负温度梯度时,道面板边缘发生翘曲。此时进行板中弯沉测量应该将 FWD 放置在道面板中心区域,若将 FWD 承载板放置在道面板几何中心则会使边缘传感器处于道面板边缘翘曲部分,造成弯沉数据失真。同样地,在白天日照强烈温度较高,道面板整体处于正温度梯度发生拱胀时,进行板中弯沉值测量,测得的板中弯沉值会偏大。

由此可见,在进行道面板弯沉测量时,FWD 放置的位置不同会造成弯沉值的变化,同时道面板处于正或负温度梯度也会造成板中、板边或板角弯沉值的失真,因此需结合 FWD 测量位置和道面板变形情况对道面板进行弯沉测量。同时建议在道面板处于零或小的负温度梯度下进行弯沉测量,此时获得的弯沉数据能更契合实际且保守地对道面性能做出评价。

3 实测弯沉值的温度修正

考虑到实际不能在固定某一时间段某一温度梯度下进行弯沉值测量,所以有必要对在不同时刻测量得到的弯沉值进行温度修正,以获得正确的弯沉值,从而对道面性能和结构强度、刚度作出更准确的评价。

从图 3 可以看出:板中、板边、板角弯沉值在道面板表面温度 25 ℃ 左右都保持在较稳定的水平,即此时道面板温度梯度接近于零,因此以道面板表面温度 25 ℃ 作为标准温度,将其他处于正、负温度梯度下的实测弯沉值换算为零温度梯度下的标准弯沉值。

根据实测得到的板中、板边、板角代表弯沉值,通过 Origin 建立起实测弯沉值与道面板表面温度的回归关系。需要注意的是,道面板表面温度 25 °C 是一个临界点,板中、板边、板角弯沉值在道面表面温度小于 25 °C 或大于 25 °C 时,弯沉值变化幅度均极小,仅 3% 左右,所以对于板中弯沉,只对道面板表面温度 25 °C 以上温度实测弯沉值进行温度修正,板边、板角弯沉只对道面板表面温度 25 °C 以下实测弯沉值进行温度修正。此外,根据图 1,考虑到 1、5、7 这 3 个传感器弯沉值所具有的代表性意义,所以主要对这 3 个传感器实测弯沉值进行温度修正。实测弯沉值与温度的回归结果见表 3。

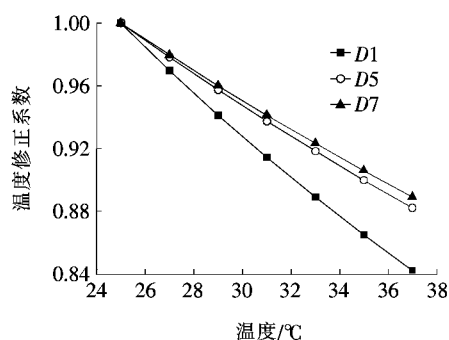
表 3 FWD 实测弯沉值与温度的回归关系

道面板位置	传感器	相关关系	相关系数
板中	1	$D=47.36+1.20T$	0.996 6
	5	$D=44.30+0.69T$	0.986 2
	7	$D=37.70+0.54T$	0.972 7
板边	1	$D=157.45-3.16T$	0.957 7
	5	$D=88.64-1.07T$	0.951 2
	7	$D=77.91-1.05T$	0.964 2
板角	1	$D=-369.86+58.18T-1.61T^2$	0.984 0
	5	$D=-228.78+36.48T-0.99T^2$	0.979 7
	7	$D=-42.34+14.41T-0.41T^2$	0.994 3

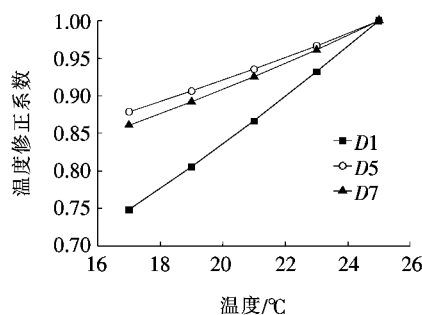
注:  $D$  为弯沉;  $T$  为温度。

由表 3 可知:板中、板边实测弯沉值与道面板表面温度有较好的线性关系,且相关性较好,相关系数值均在 0.95 以上,可通过线性回归对板中、板边实测弯沉值进行温度修正;板角实测弯沉值与温度具有极强的二项相关性,相关系数为 0.98 左右,因此对于板角弯沉值,可以通过二项回归进行温度修正;对于板中、板边、板角弯沉,修正弯沉值均等于实测弯沉值乘以温度修正系数,温度修正系数如图 7 所示。

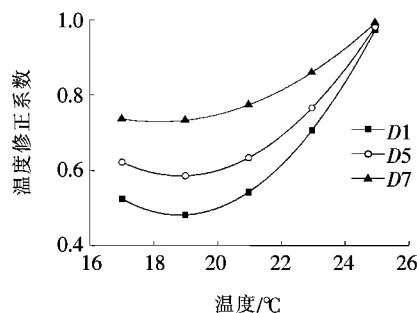
需要注意的是,由于该次测试无法获取道面板的具体温度梯度,所以只能基于道面板表面温度进行弯沉的温度修正,上述修正关系只适用于所测试的机场道面,对于其他水泥混凝土道面,由于其材料性质、道面结构设计、气候以及水泥混凝土比热容均存在差异,这些因素综合后,最终都将造成水泥混凝土道面板温度梯度的差异。为使弯沉的温度修正相关性更好,应用性更强,表 3 弯沉温度修正关系中道面板表面温度变量应为道面板温度梯度变量,即基于道面板温度梯



(a) 板中



(b) 板边



(c) 板角

图 7 实测弯沉值的温度修正关系

度这一单一变量建立温度修正关系,以获得最准确的道面弯沉。

#### 4 道面板温度特性对脱空判定的影响

根据 MH/T 5024—2009《民用机场道面评价管理技术规范》,对于水泥混凝土道面,当“板边中点弯沉/板中弯沉 $>2.0$ ”或“板角弯沉/板中弯沉 $>3.0$ ”即可判定为脱空。图 8 为板边、板角的脱空判定值随道面板表面温度的变化情况。

从图 8 可知:17~25 °C (负温度梯度)时,脱空判定值均较大,25~38 °C (正温度梯度)时,脱空判定值较小。整体看,随着道面板表面温度的升高,脱空判定

值呈递减趋势,并且脱空判定值变化范围较大,不同温度条件下测试得到的判定结果可能完全相反,图8(a)中,“板边/板中”值从超出脱空判定值15%变化到低于脱空判定值25%,图8(b)中,“板角/板中”值从超出脱空判定值18%变化到低于脱空判定值32%,脱空判定由脱空变化到未脱空,由此也可看出温度变化对于脱空判定值的影响较大。

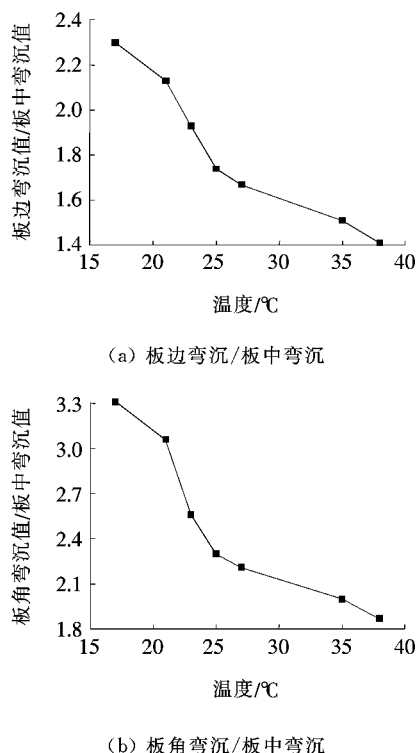


图8 道面脱空判定值随道面板表面温度的变化情况

为避免温度对脱空判定的影响,对脱空判定值进行温度修正,经修正后的脱空判定值见图9。由图9可以看出:经过温度修正后,“板边弯沉值/板中弯沉值”为1.7左右,“板角弯沉值/板中弯沉值”为2.3左右,脱空判定值均稳定在一固定水平上,两者脱空判定结果也保持一致。可以看出经温度修正后脱空判定结果更为准确真实。该结果也进一步证明了弯沉值温度修正的必要性、准确性和有效性。

## 5 结论

通过对水泥混凝土道面FWD实测弯沉盆数据的分析,可以得出以下结论:

(1) 板中弯沉值随着温度升高而增大,板边、板角弯沉值随着温度升高而减小,同期板角弯沉值较板边弯沉值大,板中、板边、板角弯沉值受温度影响程度逐

渐增加;在文中测试环境下,25℃为板中、板边、板角弯沉值变化节点,即温度梯度变化节点。

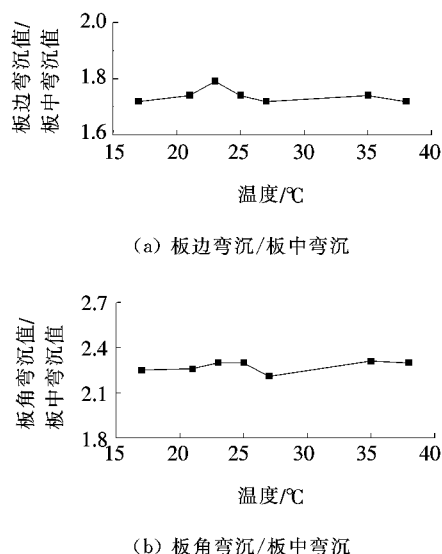


图9 经温度修正后的道面脱空判定值随道面板表面温度的变化情况

(2) 板中、板边、板角的弯沉值离散程度均与距承载板中心的距离呈正相关,距承载板中心越远,弯沉值的变异系数越小,即受温度影响越小。

(3) 由于道面板温度变化引起道面板变形,需结合FWD测量位置和道面板变形情况对道面板进行弯沉测量。

(4) 测试道面板板中、板边弯沉可通过线性回归进行温度修正,板角弯沉可通过二项回归进行温度修正。为获得相关性更好、应用性更强的弯沉温度修正关系,应基于道面板温度梯度进行弯沉温度修正。

(5) 在现有的机场道面评价规范下,脱空判定值随温度的升高逐渐降低,且变化幅度较大,不同温度下可能得到截然不同的判定结果。因此在进行脱空判定时有必要对脱空判定值进行温度修正,尤其是夏季昼夜温差较大时。

(6) 对于常年高温地区,考虑到弯沉受温度的影响较大,周期较长。弯沉的温度影响分析及温度修正具有重大意义。

## 参考文献:

- [1] MH/T 5110—2015 民用机场道面现场测试规程[S].
- [2] MH/T 5024—2009 民用机场道面评价管理技术规范[S].
- [3] Ashish Wadkar, Yusuf Mehta, Douglas Cleary. Load—Transfer Efficiencies of Rigid Airfield Pavement Joints Based on Stresses and Deflections[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(8): 1 171—1 180.

# 移动荷载作用下 CRC+AC 复合式路面 三维有限元分析

程焰兵

(湖南中大设计院有限公司,湖南 长沙 410075)

**摘要:**应用 Abaqus 构建 CRC+AC 三维动载模型,通过改变 AC 层厚、底基层模量、土基层模量、车速等变量,以路表弯沉、路面结构应力、钢筋应力为主要评价指标,揭示 CRC+AC 复合式路面的动力响应特性。计算结果显示:当基层、土基层等变量已确定时,CRC+AC 复合式路面结构存在相应最佳 AC 层厚度;提高土基模量和施工质量可以较经济实用地提高 CRC+AC 的受力性能和使用寿命;当选用较大模量底基层材料时,需对 AC/CRC 层间剪应力进行验算;对各动力响应均有一个临界速度,临界速度两侧车速对各动力响应特性的影响趋势相反。

**关键词:**CRC+AC; 三维动载模型; 动力响应; AC/CRC 层间剪应力; 临界速度

## 1 前言

连续配筋混凝土复合式路面(CRC+AC)为由连续配筋混凝土板(CRC)和沥青混凝土(AC)相组合而成的一种新式复合路面,其中 CRC 板是主要承重层,AC 层为表面功能层。该路面结构兼具耐久性和舒适性等优点,是当前长寿命路面结构的重要研究方向。现行有关 CRC+AC 的理论技术研究还不完善,仍需研究。王斌、杨军利用有限元软件探究了连续配筋混

凝土路面在不考虑水平移动荷载情况下的动力响应特性;高玲玲采用 Bisar 程序建立 CRC+AC 模型,对 CRC+AC 层间剪应力影响因素进行了分析;李盛、刘朝晖等通过 Abaqus 有限元软件,以 CRC 层最大主应力为指标,确定了 CRC+AC 临界荷位及结构层厚、模量等变量与 CRC 层荷载应力的关系;CRC+AC 不设横向接缝,当前对该路面的相关研究,也多基于静载无横向裂缝模式,而随着交通量增加,尤其是交叉口车辆频繁启停段,该路面容易产生横向裂缝。该文运用大型通用三维有限元软件 Abaqus,构筑带裂缝的路面结

- \*\*\*\*\*
- [4] Sung-Hee Kim, Joo-Young Park, Jin-Hoon Jeong. Effect of Temperature-Induced Load on Airport Concrete Pavement Behavior[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(1):182-187.
- [5] Kasthurirangan Gopalakrishnan, Marshall R. Thompson. Use of Nondestructive Test Deflection Data for Predicting Airport Pavement Performance[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(6):389-395.
- [6] 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(6).
- [7] 蒋鑫,刘竹君,曾诚,等. 板底脱空对水泥混凝土路面接缝传荷的影响[J]. 中外公路,2017(1).
- [8] 钱朝清. 机场复合道面受多轮荷载作用的力学特性分析

- [J]. 中外公路,2016(3).
- [9] 阳栋,谭立新. A380 轮载作用下刚性机场跑道临界响应研究[J]. 中外公路,2018(2).
- [10] 唐伯明,八谷好高. 东京羽田机场道面 FWD 实测弯沉的温度特性分析[J]. 土木工程学报,1995(1).
- [11] 刘海伦,李萌,杜浩. 机场水泥道面动态弯沉的温度影响分析[J]. 中国民航大学学报,2018(3).
- [12] 李盛,陈尚武,刘朝晖,等. 旧水泥混凝土路面弯沉测试的若干问题研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015(12).
- [13] 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(9).
- [14] 王维,韩利斌. 机场道面使用性能预估理论和模型[J]. 中国民航大学学报,2007(2).

收稿日期:2020-01-10(修改稿)

作者简介:程焰兵,男,硕士,工程师. E-mail:736562105@qq.com.