

水泥道面调查单元划分及病害程度对 PCI 的影响

陈文来¹, 凌建明¹, 郝航程¹, 杜浩²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 空军柳州场站, 广西 柳州 545112)

摘要: 介绍了水泥混凝土道面损坏状况调查与评价方法, 以 390 个水泥混凝土道面标准调查单元的现场数据为基础, 通过变化单元划分方法及病害程度等级, 统计分析了单元尺寸、形状特征以及病害程度人工识别误差对道面状况指数 (PCI) 精度的影响, 结果表明: 单元尺寸对 PCI 值影响较小, 单元板块数在 20 ± 5 范围内较合理, 此时 PCI 计算结果误差约为 1 点; 单元形状的不同将导致 PCI 出现明显偏差, 因此, 道面分区不可随意更改, 相对而言, 采用横向单元调查得到的道面 PCI 值较低, 但偏于安全; 单项主导损坏程度等级识别偏差对 PCI 值的影响不显著, 误差小于 2 点, 若调查单元中出现的所有病害的程度等级识别均出现偏差, 则道面 PCI 误差可达到 10 点左右。

关键词: 机场工程; 道面损坏调查; 道面状况指数; 调查单元划分; 病害程度

中图分类号: U 416.216

文献标识码: A

Effect of Unit Dividing and Distress Severity on PCI Accuracy for Cement Concrete Pavement

CHEN Wenlai¹, LING Jianming¹, HAO Hangcheng¹, DU Hao²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Liuzhou Air Force Station, Liuzhou 545112, China)

Abstract: Airport cement concrete pavement condition survey and evaluation procedure was introduced, and the effect of sample unit size, shape and distress severity on pavement condition index (PCI) accuracy was investigated by altering inspection unit size and shape and distress degree based on field data collected from 390 standard inspection units. The results show that sample unit size has little effect on PCI accuracy, and as long as the unit size is within 20 ± 5 slabs, the error is about 1 point. Altering unit shape leads to significant difference of section PCI value, therefore units dividing cannot be altered arbitrarily. PCI value calculated by horizontal units is lower relatively, but it is more conservative for

management. The effect of severity deviation of a single main distress due to manual data collection on section PCI is insignificant, and the error is limited to about 2 points, however, the average error reaches up to 10 points if severity degrees of all distress are deviated.

Key words: airport engineering; pavement condition survey; pavement condition index; unit dividing; distress severity

道面表面损坏状况评价是分析道面使用性能最直观、经济的方法, 常以道面状况指数 (PCI) 为评价指标, 采用现场调查方式对道面病害的类型、程度、数量等信息进行记录和统计, 通过计算指标值、预测发展趋势, 为道面管理决策提供技术依据。因此, 损坏调查方法及其数据精度是决定道面表面状况评价结果的关键环节。我国民用机场道面损坏调查程序主要借鉴美国 ASTM D 5340 方法^[1], 采用人工调查方式, 但对调查单元的划分方法无具体规定, 且因调查人员主观因素引起的系统误差也不明确。实际工程中由于道面设计方法及调查人员业务水平等因素差异, 现场调查单元划分随意性较强, 病害程度判识易出偏差, 导致 PCI 数据变异较大, 不同时间的调查数据难以对比和延续, 影响道面损坏状况评价结果及预估精度。因此, 分析道面调查单元划分方式及病害程度对 PCI 的影响具有重要意义。

美国空军早在 20 世纪 70 年代就展开机场道面损坏状况评估研究, 提出了 PCI 指标及其计算和评价方法, 制定了损坏调查技术要求^[2], 并被 FAA 采纳^[3]。Shahin 和 Kohn 等分析了 PCI 指标适应性, 将其推广应用于公路及其他铺面工程^[4-5]。其他发达国家以此为基础, 相继研究并制定相应的道面损坏状况调查技术要求, 但对 PCI 指标的客观性、适应性以及调查过程中相关因素对 PCI 精度的影响分析较

收稿日期: 2010-08-22

第一作者: 陈文来(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为机场设施管理. E-mail: wenlai_chen@163.com

通讯作者: 凌建明(1966—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为公路路基和机场工程. E-mail: jmling01@yahoo.com.cn

少. Shahin 分析了沥青混凝土道面调查单元尺寸和病害类型的数量对 PCI 值的影响^[6],但未涉及水泥混凝土道面. 本文结合我国道面实际情况,重点分析水泥道面损坏调查过程中单元尺寸、形状划分以及病害程度识别偏差对道面 PCI 值的影响.

1 水泥道面损坏调查与评价方法

我国民用机场道面损坏调查与评价工作是以道面分区作为位置参照系统. 道面分区按照“部位→区域→单元”三个层次进行划分,水泥道面“单元”划分以相邻的 20 块道面板范围为基本单位^[7-8].

损坏调查采用人工目测法,详细记录调查日期、单元编号、板块尺寸、损坏类型、损坏程度、损坏量等信息,以“单元”为单位进行整理和统计现场调查数据,“单元”PCI 值计算方法如下:

$$I_{\text{PCI}} = 100 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ijk} f(V, d) \quad (1)$$

式中: I_{PCI} 为单元 PCI 值; i, j 分别为损坏类型数和严重程度等级数; D_{ijk} 为 i 类损坏类型、 j 级程度、 k 范围(损坏密度)的扣分值,由各损坏对应的扣分折减曲线确定; $f(V, d)$ 为多种损坏的综合修正权函数,与累计折减值 V 和折减次数 d 有关,由综合修正折减曲线确定. 道面“区域”和“部位”PCI 值是在“单元”基础上采用面积加权方法计算^[9].

2 单元划分对 PCI 的影响

水泥混凝土道面 PCI 计算采用的一套扣分值、修正系数曲线均是在尺寸为 20 块板的标准调查“单元”的基础上建立的. 而实际工程中,鉴于道面几何构型特征,难按照标准尺寸进行单元划分. 单元尺寸及形状特征的偏差将影响单元内所包含病害的类型、数量及分布密度等参数,导致病害扣分值及综合修正系数变化,进而影响单元及区域 PCI 值计算结果.

2.1 单元尺寸的影响

为客观描述 PCI 计算值与单元尺寸的统计关系,以跑道、平滑道等在内的 13 个道面功能区域,共计 390 个标准道面单元的现场损坏数据作为样本,分别拟定几种单元尺寸,计算同区域道面 PCI 值,并与标准单元尺寸条件下的计算结果进行对比,统计分析 PCI 平均误差值及其与单元尺寸的关系. 具体方法如下:为便于与标准单元尺寸比较,将道面区域的横断面宽度选定为 5 块板,将调查单元沿区域纵

向拟定为 $5 \times 1, 5 \times 2, 5 \times 3, 5 \times 5, 5 \times 6, 5 \times 8$ 等六种尺寸,采用标准扣分方法计算不同单元尺寸的 PCI 值,比较拟定单元和标准单元计算的等面积道面“区域”PCI 结果. 如:将相邻 4 个 5×1 尺寸单元或 2 个 5×2 尺寸单元的 PCI 均值与 1 个 5×4 标准单元的 PCI 值进行对比;两个 5×4 标准单元 PCI 均值与 1 个 5×8 单元的 PCI 值进行对比. 表 1 为 13 个道面功能区域的对比结果,表中 ΔI_{PCI} 和 S 分别为各工况条件下 PCI 偏差均值及标准差. 由表可见,在各道面区域中,当单元尺寸小于标准尺寸时,计算结果偏大,单元尺寸大于标准尺寸时计算结果偏小,偏差值随单元尺寸偏离标准尺寸的增大而相应增大. 但总体而言,因单元尺寸变化导致的 PCI 计算偏差绝对值并不显著,单元板块数为 5 时,PCI 最大偏差为 12.6,平均为 4 左右;当单元板块数为 15 或 25 时,平均偏差在 ± 1 范围内.

图 1 为各个功能区域 PCI 值与单元尺寸的关系曲线,图中跑道和平滑道区域 PCI 计算值随单元尺寸变化曲线基本呈平行趋势,可见不同道面区域内,单元尺寸对 PCI 值的影响规律基本相同. 图 2 反映了区域 PCI 偏差值随单元尺寸的变化关系,图中曲线随单元尺寸增大而逐渐平缓,可见单元尺寸越小对 PCI 计算影响越显著. 因此在现场道面分区时,单元尺寸在 20 ± 5 时区域 PCI 计算值与标准值偏差较小,分区尺寸较为合理,而在异形板区域内,无法满足标准尺寸划分要求时,为保证 PCI 计算精度,单元尺寸应尽量偏大而不宜偏小.

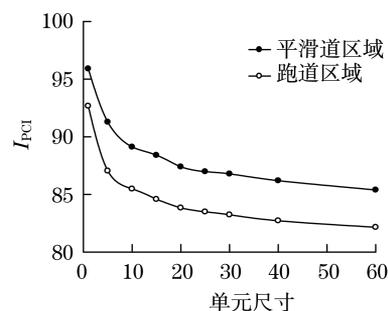


图 1 不同功能区域 PCI 与单元尺寸关系
Fig.1 Relationship between PCI and unit size in different sections

2.2 单元形状的影响

水泥道面标准单元尺寸为 20 块板,在实际工程中,由于道面分仓设计差异,在不同的道面部位或区域可用的单元形状划分方法有多种选择,如划分成沿道面长度方向的 20×1 或 10×2 的纵向单元,以及沿道面宽度方向的 5×4 或 4×5 的横向单元. 对

表 1 PCI 计算偏差
Tab.1 Calculation errors of PCI

| 区域 编号 | 单元尺寸 = 5 | | 单元尺寸 = 10 | | 单元尺寸 = 15 | | 单元尺寸 = 25 | | 单元尺寸 = 30 | | 单元尺寸 = 40 | |
|----------|-------------------------|------|-------------------------|-----|-------------------------|-----|-------------------------|-----|-------------------------|-----|-------------------------|-----|
| | ΔI_{PCI} | S | ΔI_{PCI} | S | ΔI_{PCI} | S | ΔI_{PCI} | S | ΔI_{PCI} | S | ΔI_{PCI} | S |
| 1 | 2.3 | 1.5 | 0.9 | 0.7 | 0.2 | 0.3 | -0.4 | 0.6 | -0.6 | 0.6 | -1.0 | 0.7 |
| 2 | 3.1 | 5.9 | 1.3 | 1.8 | 0.4 | 1.3 | -0.3 | 1.3 | -0.2 | 0.9 | -0.9 | 2.3 |
| 3 | 2.9 | 2.5 | 1.5 | 1.4 | 0.5 | 0.3 | -1.3 | 1.7 | -1.1 | 1.2 | -2.3 | 2.9 |
| 4 | 4.1 | 2.9 | 2.3 | 2.4 | 0.6 | 1.0 | -0.6 | 1.1 | -1.0 | 0.9 | -1.6 | 1.5 |
| 5 | 2.3 | 2.0 | 1.4 | 1.7 | 0.5 | 0.7 | -0.3 | 0.4 | -0.5 | 0.8 | -1.1 | 1.7 |
| 6 | 12.6 | 11.6 | 6.2 | 8.5 | 2.3 | 1.1 | -0.4 | 0.8 | -1.8 | 1.3 | -2.7 | 2.0 |
| 7 | 3.1 | 1.9 | 1.8 | 1.3 | 0.7 | 0.6 | -0.6 | 0.6 | -0.8 | 1.0 | -1.2 | 2.5 |
| 8 | 2.6 | 1.3 | 1.5 | 0.9 | 0.7 | 0.2 | -0.1 | 0.5 | -0.6 | 0.6 | -0.8 | 0.8 |
| 9 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.1 | 0.4 | 0.5 | -0.1 | 0.5 | -0.4 | 0.5 | -0.6 | 0.7 |
| 10 | 4.3 | 2.2 | 1.9 | 1.2 | 1.0 | 0.9 | -0.3 | 0.8 | -0.3 | 0.7 | -0.8 | 0.9 |
| 11 | 2.6 | 2.0 | 1.4 | 0.9 | 0.7 | 1.0 | -0.1 | 0.2 | -0.3 | 0.5 | -0.8 | 0.8 |
| 12 | 5.1 | 5.2 | 2.4 | 3.0 | 0.9 | 1.6 | -0.5 | 1.3 | -1.0 | 1.0 | -2.8 | 2.1 |
| 13 | 4.0 | 4.7 | 2.3 | 2.9 | 0.9 | 0.9 | -0.7 | 0.7 | -1.0 | 1.1 | -2.0 | 1.3 |

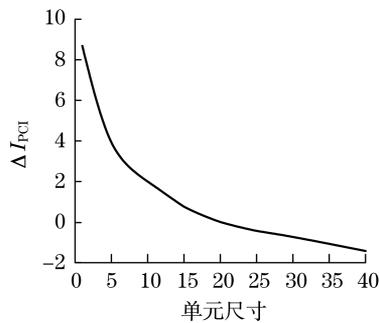


图 2 区域 PCI 偏差与单元尺寸关系
Fig.2 Relationship between section
PCI error and unit size

于跑道和滑行道而言,由于交通渠化作用,道面病害在飞机纵向轮迹附近分布更集中.因此,道面单元形状划分方法将影响单元内病害的密度,进而影响道面区域的 PCI 计算结果.为客观反映调查单元形状划分方法对相同道面区域 PCI 计算值的影响,考虑到样本数据中调查单元横向宽度多为 5 块板的实际情况,采用 20×1 纵向单元和 5×4 横向单元两种工况条件,分析单元划分方案对道面区域 PCI 值的影响.

图 3 为按照两类单元划分调查得到的区域 PCI 值对比情况,由图可见,大多数区域内采用纵向单元调查计算的 PCI 值大于横向单元,少数区域纵向单元计算 PCI 值略小于横向单元.而两类单元的 PCI 计算偏差随着区域 PCI 值的降低呈逐渐增大趋势.分析其主要原因为,在 PCI 计算过程中为避免扣分过高,需对单项损坏扣分进行综合修正,当单元内单项扣分越大则修正作用越显著,相比单元内各项损坏的扣分总和而言,修正后的总扣分值要小

得多.故在纵向单元内由于病害集中,PCI 计算的修正作用显著,而在横向单元内修正作用小,PCI 降低值接近单项扣分值总和.由此导致纵向划分单元计算得到的区域 PCI 结果偏大,但在与联络道相接位置,纵向单元病害分布更均匀,因而计算结果偏低.

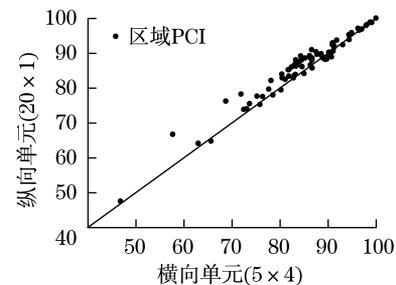


图 3 两类单元计算区域 PCI 对比

Fig.3 Comparison of two type units on section PCI

总体而言,病害的分布集中是导致不同单元划分方法之间出现 PCI 偏差的主要原因.图 4 和图 5 分别为平滑道和跑道区域内单元划分方案对区域 PCI 的影响,由图可知,在平滑道区域内两类单元计算的区域 PCI 值基本接近,而在跑道区域内二者平均相差 3 左右.其原因主要为,相对跑道而言平滑道区域道面损坏更均匀,即使不同的单元尺寸下也呈现类似的规律,由此进一步说明了调查单元的划分对道面区域 PCI 的计算存在一定影响.纵向划分单元能够区分轮迹带和非轮迹带区域的道面损坏程度和特征,便于指导管理者对重点区域及时实施日常或专项维护.但横向单元计算 PCI 值偏低,其结果更偏于安全,而需要指出的是,不论采用何种调查单元,一旦道面分区方案确定后不可随意更改,否则将影响道面损坏状况评价结果.

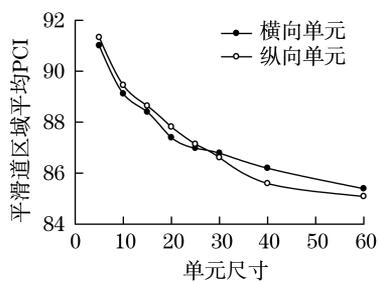


图 4 平滑道区域单元划分对 PCI 的影响

Fig.4 Effect of unit dividing on PCI accuracy for taxiway pavement

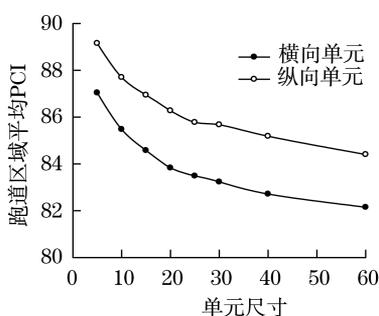


图 5 跑道区域单元划分对 PCI 的影响

Fig.5 Effect of unit dividing on PCI accuracy for runway pavement

3 损坏程度判别误差对 PCI 的影响

3.1 水泥道面主导损坏

我国道面损坏调查程序中规定了水泥道面 15 种病害类型^[7]. 在实际工程中, 将道面单元中出现频率较高、扣分值最大的损坏类型称为该单元的主导损坏, 主导损坏是道面 PCI 值下降的主要原因, 常常为一种或几种常见病害.

对华东地区十多个机场的水泥道面病害进行调

研和统计, 结果如图 6 所示, 出现频率或扣分比例较高的损坏有 7 类, 分别是填缝料损坏、起皮、小补丁、接缝破碎、角隅断裂、坑洞和大补丁, 其他病害极少出现或比例均不足 2%, 因此, 文中以此 7 类典型病害为主导损坏进行分析.

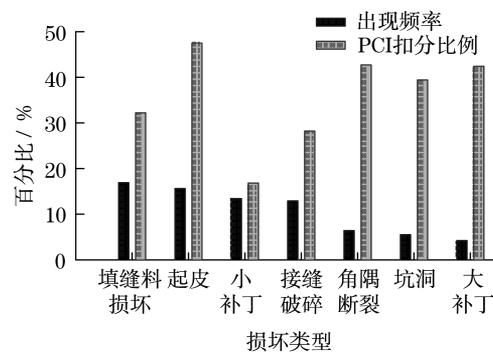


图 6 道面主导损坏类型

Fig.6 Dominant distress type of pavement

3.2 损坏程度对 PCI 的影响

道面损坏状况人工调查过程中, 道面病害程度的识别偏差是影响 PCI 计算和评价结果的重要因素. 由于损坏程度对 PCI 的影响与病害组合、密度及扣分排序等有关, 无法通过确定的函数关系进行描述. 故以 2 788 个损坏单元的现场调查数据为样本, 采用统计方法分析损坏程度偏差对单元和区域 PCI 的影响特征. 道面损坏程度一般可分为轻(L)、中(M)、重(H)三个等级(少数病害不分等级), 假设调查人员对损坏程度的识别偏差在一个等级内, 为客观、科学地反映主导损坏程度变化对 PCI 的影响, 分别考虑主导损坏程度提高一个等级(L→M 或 M→H)和降低一个等级(M→L 或 H→M)时单元和区域的 PCI 计算值与原始值间的偏离程度. 表 2 给出了不同条件下, 道面主导损坏程度对 PCI 计算值的影响.

表 2 损坏程度对 PCI 的影响

Tab.2 Effect of distress severity on PCI accuracy

| 病害名称 | 单元 PCI 变化平均值 | | | | 区域 PCI 变化平均值 | | | |
|-------|--------------|-----|-------|-----|--------------|-----|------|-----|
| | L→M | M→L | M→H | H→M | L→M | M→L | M→H | H→M |
| 填缝料损坏 | -4.2 | 4.0 | -4.1 | 3.5 | -1.1 | 0.5 | -0.5 | 0.6 |
| 起皮 | -9.0 | 8.0 | -11.5 | 8.1 | -3.0 | 1.8 | -2.8 | 1.4 |
| 小补丁 | -3.1 | 2.5 | -2.7 | 3.0 | -1.2 | 0.2 | -0.1 | 0.2 |
| 接缝破碎 | -2.5 | 2.4 | -6.0 | 7.1 | -1.0 | 0.4 | -0.5 | 1.2 |
| 角隅断裂 | -4.6 | 2.5 | -3.9 | 4.2 | -0.9 | 0.4 | -0.5 | 0.3 |
| 大补丁 | -8.1 | 7.4 | -7.3 | 5.3 | -2.8 | 0.6 | -1.0 | 0.6 |

由表 2 可知, 单项主导损坏程度判断偏差时, 单元 PCI 变化均值最大为 11.5, 最小为 2.4, 多数集中于 ±5 左右, 不难看出单元主导损坏程度的准确判断

对单元 PCI 有较显著的影响. 然而区域 PCI 的变化最大值为 3, 其他基本在 ±2 范围内变化, 由此可见, 单项主导损坏的程度偏差在一个等级时, 区域 PCI

的计算结果较为稳定,受人为因素的干扰较小.

如按照最不利情况考虑,即所有病害的损坏程度均提高或降低一个等级,得到分析结果如图 7 和图 8 所示.可见 PCI 最大偏差量和离散程度随原始

PCI 值降低而增大,说明道面病害越多,损坏越严重时,损坏程度的识别误差对 PCI 的影响越显著.同时可见,区域 PCI 散点拟合曲线明显偏离对角线,区域 PCI 的变化较大,平均偏差值为 10 左右.

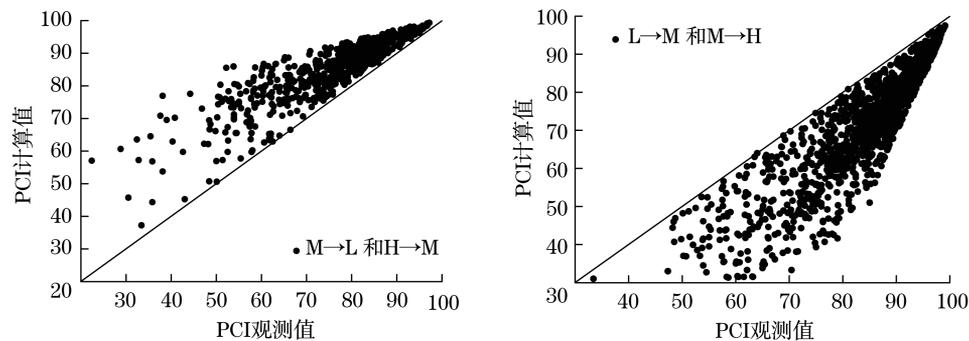


图 7 损坏程度对单元 PCI 的影响

Fig. 7 Effect of distress severity on unit PCI accuracy

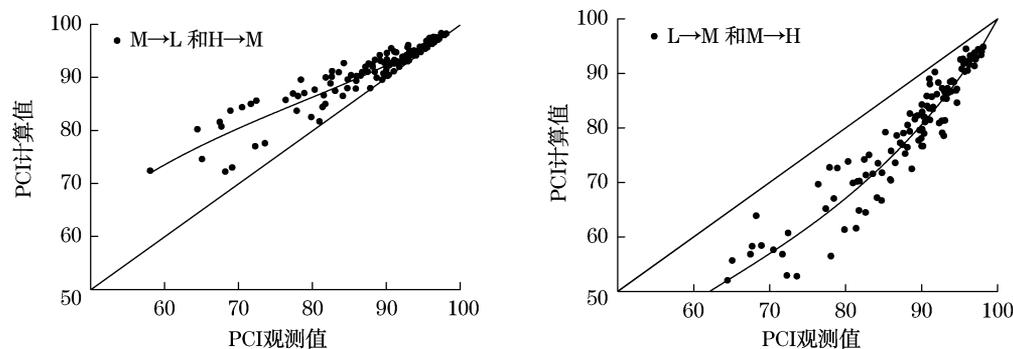


图 8 损坏程度对区域 PCI 的影响

Fig. 8 Effect of distress severity on section PCI accuracy

4 实例分析

为进一步检验道面调查单元划分方法及道面病害程度等级识别偏差对 PCI 值影响的统计规律,采用江苏某 4D 机场 2009 年 3 月的道面损坏调查数据进行实例分析.具体如下:选取跑道部位病害较密集的“R1”区域作为分析对象,区域尺寸为 10×140 ,单元尺寸划分为: 5×3 , 5×4 , 5×5 ;单元形状划分为 1×20 , 2×10 , 5×4 .道面主导损坏为:填缝料损坏、起皮、接缝破碎、小补丁.采用不同道面单元形状计算得到的区域 PCI 值对比结果如表 3 所示,由表可知:单元尺寸变化引起的 PCI 值偏差为 1.1,与统计结果基本一致;单元形状划分对 PCI 的影响同样符合统计规律,即病害分布相对越集中则 PCI 值越大,采用 1×20 单元形式计算 PCI 值最大,而 5×4 单元计算 PCI 值最小, 2×10 单元介于二者之间.

病害程度识别偏差对 PCI 的影响结果如表 4 所

示.主导损坏中起皮由轻度判为中度时对区域 PCI 值的影响最为显著,其值为 -2.2.而区域中所有主导损坏程度均提高一个等级时,PCI 的影响偏差为 -9.2.该现象基本与统计结果相符合.由此可见,以上统计结果对个体案例具有较强的适应性和可靠性.对其他地区机场同样具有参考价值.

表 3 不同单元形状下区域 PCI 计算结果

Tab. 3 Result of section PCI in different units dividing

| | 单元类型 | | | | |
|-----------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | 5×3 | 5×5 | 5×4 | 1×20 | 2×10 |
| 区域 PCI 值 | 93.5 | 91.6 | 92.4 | 94.3 | 93.9 |
| 区域 PCI 偏差 | 1.1 | -0.8 | 0 | 1.9 | 1.5 |

5 结论

分析了水泥混凝土道面单元尺寸、形状特征以及道面损坏程度等因素对其 PCI 计算结果的影响,得到以下几点结论:

表 4 不同损坏程度对区域 PCI 的影响结果
Tab.4 Effect of distress severity on section PCI accuracy

| 病害名称 | 区域 PCI 变化值 | | | | | |
|-------|------------|-----|------|-----|---------------|---------------|
| | L→M | M→L | M→H | H→M | L→M 和 M→H 累加值 | H→M 和 M→L 累加值 |
| 填缝料损坏 | -1.6 | 0.9 | -0.8 | 0.3 | | |
| 起皮 | -2.2 | 0.9 | -1.2 | 0.2 | -9.2 | 3.1 |
| 接缝破碎 | -1.0 | 0.8 | -1.2 | 0.8 | | |
| 小补丁 | -0.5 | 0.1 | -0.2 | 0.1 | | |

(1) 调查单元尺寸对 PCI 的影响较小,单元尺寸在 20 ± 5 时区域 PCI 计算值与标准值偏差为 ± 1 左右.但单元尺寸越小,PCI 的误差越大.故在无法满足标准尺寸划分要求时,单元尺寸应尽量偏大而不宜偏小.

(2) 由于交通渠化作用,调查单元的形状对 PCI 计算结果有一定的影响,相同区域内纵向 20×1 单元计算 PCI 值大于 5×4 单元,且在跑道区域差异更显著.从道面管理安全和调查操作性的角度出发,建议采用 5×4 类单元,而且分区确定后不得随意更改.

(3) 单项主导损坏程度的识别偏差对单元 PCI 的影响较大,对区域 PCI 的影响不显著,平均偏差值在 ± 2 以内.如考虑病害程度识别均存在偏差的最不利条件,则区域 PCI 误差均值在 ± 10 左右.因此,为保证道面 PCI 计算精度和评价结果的客观和稳定,调查人员应尽量固定,并具备较高业务水平.

参考文献:

- [1] ASTM D 5340—03 Standard test method for airport pavement condition index surveys[S]. [S. l.]: ASTM International, 2004.
- [2] Shahin M Y, Darter M I, Kohn S D. Development of a pavement maintenance management system[R]. Tyndall: U S Air Force Engineering and Services Center, 1977.
- [3] Advisory circular 150/5380—6 Guidelines and procedures for maintenance of airport pavements[S]. Washington D C: Federal Aviation Administration, USA Department of Transportation, 1982.
- [4] Shahin M Y, Kohn S D. Pavement maintenance management for roads and parking lots[R]. Champaign: U S Army Construction Engineering Research Laboratory, 1981.
- [5] Kohn S D, Shahin M Y. Evaluation of the pavement condition index for use on porous friction surfaces[R]. Champaign: U S Army Construction Engineering Research Laboratory, 1984.
- [6] Shahin M Y, Stock C, Crovetto M, et al. Effect of sample unit size and number of survey distress types on the pavement condition index for asphalt surfaced roads[C]// Transportation Research Record No. 1508. Washington D C: Transportation Research Board, 1995: 60—71.
- [7] 中国民用航空局. MH/T5024—2009 民用机场道面评价管理技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- Civil Aviation Administration of China. MH/T5024—2009 Specifications of pavement evaluation and management for civil airports[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [8] Advisory circular 150/5370—11A Use of nondestructive testing in the evaluation of airport pavements[S]. Washington D C: Federal Aviation Administration, USA Department of Transportation, 2004.
- [9] Shahin M Y. Pavement management for airports, roads, and parking lots[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2005.
- [5] Zeldin B A, Spanos P D. Random field representation and synthesis using wavelet bases [J]. Journal of Applied Mechanics, 1997, 63: 946.
- [6] 周岱, 马骏, 吴筑海, 等. 空间结构三维风速时程模拟及其小波分析[J]. 工程力学, 2006, 23(3): 88.
- ZHOU Dai, MA Jun, WU Zhuhai, et al. The improved simulation and wavelet analysis of wind velocity time series for long-span spatial structures[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(3): 88.
- [7] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
- HUANG Bencai. Wind-resisting analysis principles and applications for structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001.
- [8] Dahlhaus R. Fitting time series models to nonstationary processes[J]. Ann Statist, 1997, 25: 1.
- [9] Krystal A D, Prado R, West M. New methods of time series analysis for nonstationary EEG data: eigenstructure decompositions of time varying autoregressions [J]. Clin Neurophysiol, 1999, 110: 1.
- [10] Paulik M J, Mohankrishnan N, Nikiforuk M. A time varying vector autoregressive model for signature verification[C]// Proceedings of the 37th Midwest Symposium on Circuits and Systems. Lafayette: [s. n.], 1994, 2: 3—5.

(上接第 1585 页)