

机场水泥混凝土道面脱空判定及影响

黄勇¹, 袁捷², 谭悦², 刘玉海²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 根据现场实测弯沉数据和理论计算结果, 提出了适用于机场水泥混凝土道面的基于 HWD (High Weight Deflector) 弯沉测试的脱空判定标准。采用三维有限元软件 ABAQUS, 分析了不同脱空状态对道面荷载应力的影响, 并给出了不同脱空程度对道面使用寿命影响的算例。研究表明, 水泥混凝土道面板边脱空判定标准为“板边弯沉/板中弯沉 > 1.8 ”; 板角脱空判定标准为“板角弯沉/板中弯沉 > 3.0 ”; 道面脱空严重时, 道面板的荷载应力增幅超过 250%, 道面使用寿命下降迅速; 在脱空发展初期时, 脱空面积的影响并不显著, 随着脱空区域基层反应模量下降, 脱空面积影响的显著性迅速增大。

关键词: 机场; 水泥混凝土道面; 脱空; 判定标准; 荷载应力; 使用寿命

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

Identification of Void Beneath Airport Cement Concrete Pavement and Its Influence

HUANG Yong¹, YUAN Jie², TAN Yue², LIU Yuhai²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: According to the field test data and theoretical calculation result, a standard based on high weight deflector (HWD) testing was established to identify void beneath airport cement concrete pavement. An analysis was made of the influence of all kinds of voids on loading stresses of airport cement concrete pavement with ABAQUS 3D-FEM model, and an example was given to show the influence of void on pavement's service life. The result shows that identification standard for void beneath slab edge is “slab edge deflection/slab center deflection > 1.8 ”, and void identification standard

for void beneath slab corner is “slab corner deflection/slab center deflection > 3.0 ”. When the void beneath slab becomes prominent loading stresses of airport cement concrete pavement will increase by over 250%, and the pavement's service life is shortened distinctly. The influence of the void area is not obvious on the early stage of void development, but it increases while the base response modulus of void region decreases.

Key words: airport; cement concrete pavement; void; identification criteria; loading stresses; service life

国内外公路行业对脱空的研究较多。在脱空的判定方面, 1984 年, 波特兰水泥协会 (PCA) 基于美国各州公路工作者协会 (AASHTO) 道路试验成果提出冲刷损伤模型, 以板角挠度作为脱空的评价指标^[1]。1983 年和 1986 年, Dempsey, Phu 等应用能量模型建立了冲刷与水挤出的速率、交通荷载和路面挠度之间的相互关系^[2-3]。1990 年, 美国国家协作公路研究所 (NCHRP) 提出了经验性的脱空判别模型^[4]。国内以唐伯明为代表, 较早进行了基于 FWD 落锤式弯沉仪判定脱空的研究^[5]。

在脱空对路面的影响方面, 1919 年和 1924 年, Goldbeek, C. Older 假设路面为悬臂梁, 并在板角处作用集中荷载, 推导了设计刚性路面的简易公式^[6]。1939 年, E. F. Kelley 提出了局部脱空下的板角、板边应力经验公式^[7]。1946 年, Pickett 提出了考虑角隅传荷和翘曲影响的板角最大应力经验公式^[8]。在有限元方法广泛应用以后, 国内以姚祖康、唐伯明、刘伯莹、谈至明等为代表, 对水泥路面脱空后应力计算进行了深入研究^[9-14]。

机场道面与公路路面有着显著的差异性, 其中主要体现在荷载、面层厚度上。机场飞机轮载重, 起

收稿日期: 2011-04-14

第一作者: 黄勇 (1972—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为道路工程。E-mail: huangyong0991@163.com

通讯作者: 袁捷 (1971—), 男, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为路基路面及机场工程。E-mail: yuanjie@tongji.edu.cn

落架构型也与汽车相差较大;机场道面面层厚度可达 46 cm,远超过公路面层厚度,所以公路上的研究成果并不能完全符合机场实际情况.本文将大量现场实测数据的回归分析与理论研究相结合,提出适用于机场水泥混凝土道面的脱空判定标准,并明确脱空对道面荷载应力及使用寿命的影响.

1 脱空判定方法

对于脱空的检测方法,国内外做过大量试验及研究,包括超声波探地雷达法、瑞雷面波法、振动特征分析法、弯沉评定法和红外温度成像法^[15]等.其中只有弯沉检测方法得到了广泛认可和应用,其他方法目前更多还是处于理论研究阶段,应用效果不佳.弯沉检测法主要分为 FWD 检测和贝克曼梁检测两种.

机场通常采用重型落锤式弯沉仪(High Weight Deflector, HWD)进行弯沉检测. HWD 与 FWD 基本相同,只是最大测试荷载更大,达 20 t,可保证机场较厚道面在测试时得到足够的动态响应. HWD 是无损结构测试设备,具有原位测试、速度快、不破坏道面结构、检测后不需修补等优点. HWD 弯沉测试的技术参数主要包括测试荷载等级、传感器布设形式、承载板尺寸选择、测点位置的布置等. HWD 弯沉测试示意图如图 1 所示.

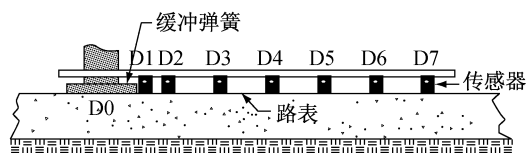


图 1 HWD 弯沉测试示意图

Fig.1 Model of HWD test

采用 HWD 对水泥混凝土道面进行脱空检测时,一般同一块板测试 3 个点位,分别为板边、板中和板角.采用板边与板中弯沉比和板角与板中弯沉比来判定板边和板角是否存在脱空.测点分布如图 2 所示.

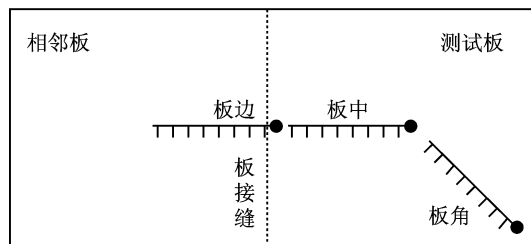


图 2 HWD 测点分布示意图

Fig.2 HWD detection points distribution

2 脱空判定标准

制定出合适的脱空判定标准是决定该脱空判定方法能否应用的关键.在公路行业中,不同单位和研究人员针对弯沉判定脱空制定了很多不同的标准.

在采用贝克曼梁进行脱空评定方面,现行《公路水泥混凝土路面养护技术规范》(JTJ073.1.2001)规定,用后轴重 100 kN 的黄河 JN150 卡车和 5.4 m 长的贝克曼梁检测板角和板边弯沉,凡弯沉值大于 0.2 mm 即判定为脱空.在采用 FWD 进行脱空评定方面尚无统一的标准,曹东伟等根据弹性地基板的近似梁法经过计算与分析给出了采用板中弯沉与板边弯沉值之比判断板底脱空状况的方法^[16].类似的研究有很多,大多通过将板假定为弹性梁的方法推导出一些公式,这些推导结果有一定的理论意义.但由于存在较多假设与简化,推导结果与实际情况有一定的偏差.

本文在对大量道面板测试数据进行统计分析的基础上,通过 EverFE2.24 有限元数值模拟和对比分析,建立以“板边弯沉/板中弯沉”和“板角弯沉/板中弯沉”为指标进行道面板块脱空判定的评价标准.

2.1 实测数据统计

对上海某机场新建飞行区 108 块水泥混凝土道面板进行 HWD 弯沉测试,每块板分别测试板中、板边和板角 3 个点位.分析计算每块板的“板边弯沉/板中弯沉”和“板角弯沉/板中弯沉”的比值,计算结果如图 3 所示,对数据进行统计分析,如表 1 所示.测试区域道面板厚度为 42 cm,设计基层顶面反应模量为 $130 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$.

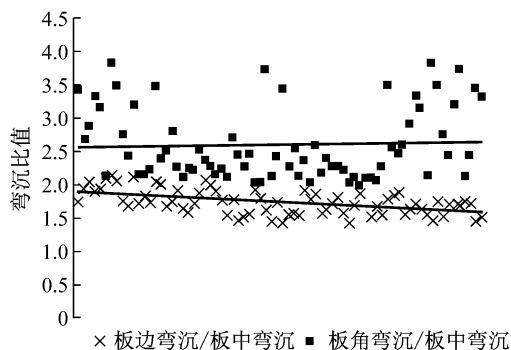


图 3 上海某机场实测弯沉比值分布图

Fig.3 The measured deflection ratio distribution of an airport in Shanghai City

从图 3 和表 1 可以看出,现场实测数据结果为:“板边弯沉/板中弯沉”的平均值为 1.74,变异系数为

10.93%；“板角弯沉/板中弯沉”的平均值为 2.61，变异系数为 20.36%。由图 3 可以看出，虽然大部分测试结果分布较为集中，但仍有部分结果有一定离散性，分析原因可能是部分区域板块的接缝传力杆设置有所差异，导致测试结果有偏差。

表 1 上海某机场实测弯沉比值统计

Tab.1 Statistics for deflection ratio of Shanghai airport

比值	平均值	最小值	最大值	变异系数/%
板边弯沉/板中弯沉	1.743	1.426	2.138	10.93
板角弯沉/板中弯沉	2.612	2.000	3.833	20.36

测试区域为同一种道面结构，不能考虑不同板厚对弯沉比值的影响。这一点将在有限元数值模拟中进行考虑。

本文选取福建已投入运行 15 年的某机场跑道实测弯沉数据进行分析，以对比新旧机场道面弯沉数据的差异。共测试 150 块道面板的板边、板中和板角弯沉，测试区域道面板厚度为 37 cm，基层顶面反应模量 $88 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。“板边弯沉/板中弯沉”和“板角弯沉/板中弯沉”比值的统计结果如图 4 和表 2 所示。

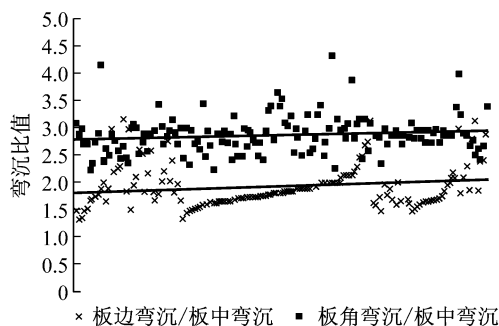


图 4 福建某机场实测弯沉比值分布图

Fig.4 The measured deflection ratio distribution of an airport in Fujian Province

表 2 新建机场实测弯沉比值统计

Tab.2 Statistics for the measured deflection ratio of an airport in Fujian Province

比值	平均值	最小值	最大值	变异系数/%
板边弯沉/板中弯沉	1.932	1.323	3.392	21.00
板角弯沉/板中弯沉	2.871	2.211	4.335	11.90

对比表 1 和表 2 数据可以看出，使用若干年后的机场道面弯沉比值比新建机场要大，其中“板边弯沉/板中弯沉”的平均值大 11.42%，“板角弯沉/板中弯沉”的平均值大 9.92%。导致该情况最可能的原因是板底出现脱空。

2.2 有限元数值模拟

采用有限元软件模拟 HWD 弯沉荷载分别作用

于板边、板中和板角 3 个点的弯沉。考虑多种工况，计算得到不同工况下板边、板中和板角 3 个点的荷载弯沉。以不同工况条件下“板边弯沉/板中弯沉”和“板角弯沉/板中弯沉”的值作为制定脱空判定标准的依据。

计算采用水泥混凝土路面力学分析专业三维有限元软件 EverFE2.24，该软件可以考虑多块道面板的相互作用，并对接缝作出合理的设置。大量工程应用表明，该软件的计算结果精度非常高，完全可以满足工程需要。

计算模型将水泥道面简化为单层板作用在 Winkler 地基上，基层顶面反应模量取 $130 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。同时考虑相邻 9 块道面板的相互作用，板的尺寸为 $5.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ ，弹性弯拉模量为 36 GPa，板的厚度分别考虑 34, 36, 38, 40, 42 和 44 cm 共 7 种工况。荷载为模拟实际 HWD 弯沉测试荷载，将实际的圆形（直径 30 cm）均布荷载等效为正方形（边长 26.6 cm）均布荷载，大小为 140 kN，分别计算荷载作用于板中、板边和板角 3 个点时的弯沉。各种工况的计算结果如图 5 和表 3 所示。

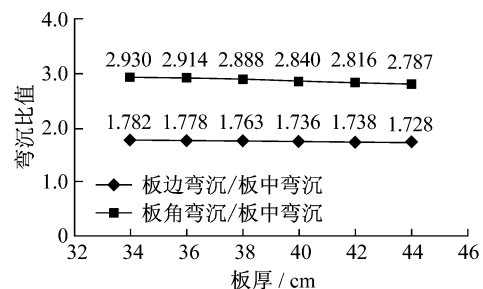


图 5 各种工况下弯沉比值计算结果

Fig.5 Results of deflection ratio under different conditions

表 3 各种工况下不同点位弯沉计算结果

Tab.3 Results of the deflection of different spots under different conditions

板厚/cm	弯沉/mm			弯沉比值	
	板中	板边	板角	板边/板中	板角/板中
44	0.202	0.349	0.563	1.728	2.787
42	0.206	0.358	0.580	1.738	2.816
40	0.212	0.368	0.602	1.736	2.840
38	0.215	0.379	0.621	1.763	2.888
36	0.221	0.393	0.644	1.778	2.914
34	0.229	0.408	0.671	1.782	2.930

注：弯沉比值表示该工况条件下板边或板角的计算弯沉与板中计算弯沉的比值。

从实测结果和理论分析结果对比可以得出以下结论：

(1) 新建机场实测数据与理论计算结果吻合较

好. 实测结果“板边弯沉/板中弯沉=1.743”、“板角弯沉/板中弯沉=2.612”, 对应板厚为 42 cm 的理论计算结果为“板边弯沉/板中弯沉=1.738”、“板角弯沉/板中弯沉=2.816”, 分别相差 2.88% 和 7.66%.

(2) 从理论计算结果可以看出, 随着板厚增加, “板边弯沉/板中弯沉”和“板角弯沉/板中弯沉”的值会略有减小, 但减小幅度不大. 实际工作中可忽略道面板厚变化对弯沉比值的影响.

(3) 鉴于我国机场水泥混凝土道面厚度通常在 34~44 cm, 建议在接缝传荷能力完好的情况下, 将板边和板角脱空的 HWD 弯沉测试判定标准设定为“板边弯沉/板中弯沉>1.8”、“板角弯沉/板中弯沉>3.0”. 如果针对特定厚度的道面, 可参考表 3 的中计算结果进行精确控制. 考虑到实际测试的误差, 可对判定标准适当放宽.

3 脱空对道面的影响

脱空对道面的影响主要体现在使道面板的荷载应力增加, 从而降低道面结构承载能力, 缩短道面使用寿命. 通过采用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟, 在只考虑单板情况下分析不同道面厚度、不同脱空面积及不同脱空程度综合条件下脱空对道面荷载应力的影响. 以上海某机场为例, 计算不同脱空程度对道面使用寿命的影响.

3.1 有限元模型

3.1.1 模型参数

采用通用有限元软件 ABAQUS 6.6 为计算平台, 建立单块板三维足尺模型, 板块尺寸 5.0 m×5.0 m, 厚度分别考虑 36, 38, 40 和 44 cm. 道面板弹性模量为 36 GPa, 泊松比为 0.15; 基层顶面反应模量为 130 MN·m⁻³; 荷载采用 B777-300 主起落架荷载参数(表 4), 荷载作用位置示意图如图 6 所示; 模型边界条件为四边自由, 计算单元采用 C3D8I.

表 4 B777-300 的荷载参数

Tab.4 Load parameters of B777-300

主要参数	数值
最大起飞重量/kN	2945
主起落架个数 n_c /个	2
机轮数 n_w /个	6
主起落架荷载分配系数 p	0.95
主起落架单轮荷载 P_s /kN	233
胎压/MPa	1.48
轮印尺寸/(m×m)	0.33×0.48
轴距/m	1.45
同轴轮距/m	1.40

注: 轮印尺寸按面积等效转换为矩形.

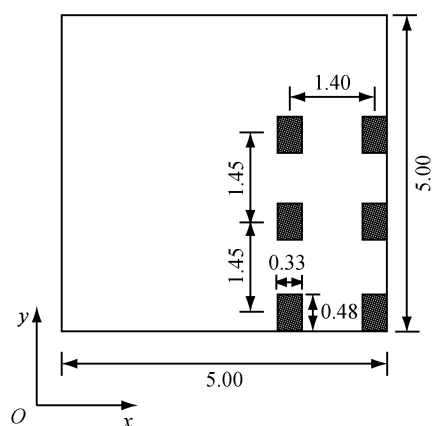


图 6 B777-300 主起落架轮载作用位置(单位:m)

Fig.6 Position of B777-300's main landing gear wheel load on the slab

3.1.2 脱空模拟

脱空通常出现在板边和板角位置, 由于板角本身就是板块受力的最不利部位, 因此本文在对脱空的模拟中只考虑板角脱空情况. 为了便于单元划分和保证计算精度, 脱空区域设定为正方形, 如图 7 所示, 脱空尺寸分为 1.0 m×1.0 m 和 2.0 m×2.0 m 两种.

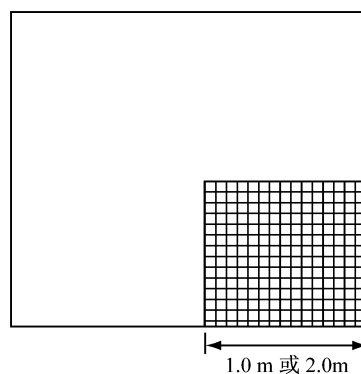


图 7 脱空区域尺寸示意图

Fig.7 Schematic drawing of void region size

通过对脱空板块现场钻芯取样发现, 基层脱空并不一定表现为基层与面层完全脱离, 大多情况只是基层细集料缺失、粗集料呈蜂窝状, 其对应的基层顶面反应模量不一定是零, 只是较完好状况时有所下降. 当脱空程度进一步发展时才会使基层与面层完全脱离. 因此, 本文对脱空的模拟采用对脱空区域基层顶面反应模量进行折减的方式, 折减系数分别取为 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 和 0 共 6 种, 对应的基础顶面反应模量分别为 130, 104, 78, 52, 26, 0 MN·m⁻³.

本文综合考虑 4 种道面厚度、2 种脱空尺寸、6 种脱空程度共 48 种工况, 计算分析不同脱空状况对

不同道面厚度的影响程度。

3.2 计算结果分析

脱空对道面荷载应力的影响计算结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,脱空对道面的影响随着脱空面积、脱空程度的增大而急剧增加。以板厚为 36 cm 算例为例,在脱空区域为 2.0 m×2.0 m、完全脱空条件下,板内最大弯拉应力由 2.727 MPa 增加到 10.240 MPa,增幅达到 275.50%。此时的荷载应力远远大于水泥混凝土材料的弯拉强度,板块会被直接压断。即使在脱空区域为 1.0 m×1.0 m、完全脱空条件下,板内最大弯拉应力也会增加 89.73%。脱空导致板块的荷载应力显著增加,即使增加幅度不至于使板块被直接压断,但也会大大减低道面的使用寿命,增大出现断板、裂缝等结构性病害的可能性。

《民用机场道面评价管理技术规范》(MH/T5024—2009)规定,道面结构剩余寿命是评价道面

结构承载能力的指标之一。下面根据该规范结构剩余寿命的计算方法,计算脱空对板块使用寿命的影响。

选择板厚为 44 cm 算例的荷载应力计算结果,航空交通量数据选用上海某机场的实际数据。采用容许作用次数 N_e 来表征道面使用寿命, N_e 表示当前道面还能允许评价机型作用的次数。需要指出的是,容许作用次数 N_e 并不是飞机起降次数的概念,两者需要通过轴载换算并考虑轮迹横向分布后才能等效。 N_e 的计算公式如下:

$$N_e = 10^{(14.048 - 15.117\sigma_p/f_m)} \quad (1)$$

式中: f_m 为板块设计弯拉强度,取 5.0 MPa; σ_p 为计算应力, $\sigma_p = (1 - \beta)\sigma_e$, β 为应力折减系数,通常取 0.25, σ_e 为最大弯拉应力,由有限元软件计算得出。

不同脱空程度对道面使用寿命的影响计算结果如表 5 所示。

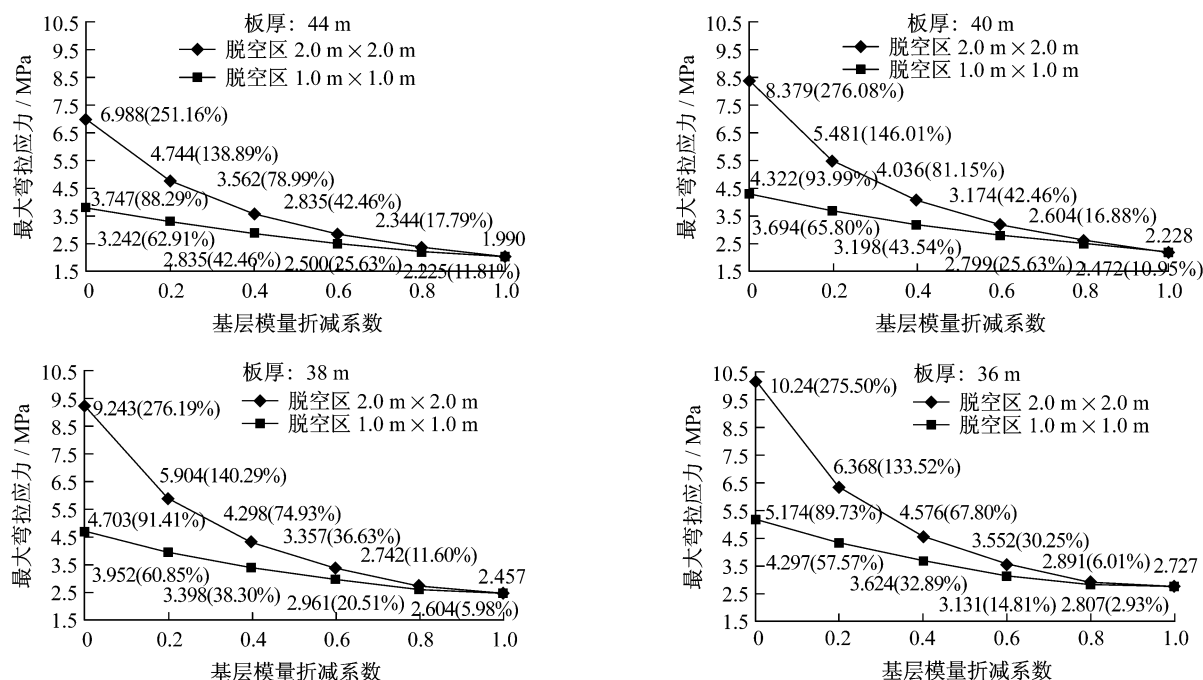


图 8 不同脱空程度对板块荷载应力影响对比分析图

Fig.8 Comparison of the influence of different voids under slab on the loading stress of the slab

表 5 脱空对道面使用寿命的影响

Tab.5 Influence of the void on pavement service life

基层顶面反应 模量折减系数	脱空面积(2.0 m×2.0 m)		脱空面积(1.0 m×1.0 m)	
	最大弯拉应力/MPa	N_e	最大弯拉应力/MPa	N_e
1.0	1.99	1 081 919 629	1.99	1 081 919 629
0.8	2.34	138 768 853	2.23	276 765 849
0.6	2.84	8 039 286	2.50	56 137 103
0.4	3.56	118 452	2.84	8 039 286
0.2	4.74	125	3.24	758 195
0	6.99	0	3.75	40 498

从表5计算结果可以看出,不同的脱空状况对道面使用寿命的影响差别很大.对比两种不同脱空面积的计算结果可以发现,在脱空程度较轻时,脱空面积对道面的影响显著性不大;而在脱空程度严重时,脱空面积对道面的影响显著性迅速增大.表5中,折减系数为0.8时,脱空面积(1.0 m×1.0 m)的 N_e 约是脱空面积(2.0 m×2.0 m)的2倍;而折减系数为0.2时,脱空面积(1.0 m×1.0 m)的 N_e 约是脱空面积(2.0 m×2.0 m)的6 060倍.

4 结论

(1) 采用HWD弯沉测试判定机场水泥混凝土道面板底脱空时,在接缝传荷能力完好的情况下,板边脱空的判定标准为“板边弯沉/板中弯沉 >1.8 ”,板角脱空的判定标准为“板角弯沉/板中弯沉 >3.0 ”.考虑到测试误差,实际工程中应适当放宽.

(2) 脱空对道面荷载应力影响非常大.脱空严重时,道面板荷载应力增幅可在250%以上.

(3) 脱空程度轻时,脱空面积的影响显著性较小;当脱空严重时,脱空面积的影响显著性迅速增大.

(4) 脱空对道面使用寿命影响显著.

参考文献:

- [1] PCA. Thickness design of concrete highway and street pavements[R]. Skokie: PCA, 1984.
- [2] Dempsey B J. Laboratory and field studies of channeling and pumping in pavement systems[R]. Paris: PLARC Seminar, 1983.
- [3] Elmer C, Hansen, Roy Johannesen. Field effects of water pumping beneath concrete pavement slabs[J]. Journal of Transportation Engineering, 1991, 117(6):23.
- [4] NCHRP. Calibrated mechanistic structural analysis procedures for pavement[R]. Champaign: University of Illinois at Urbana Champaign, 1990.
- [5] 唐伯明.落锤式弯沉仪在路面结构状况评定中的应用[D].南京:东南大学交通学院,1990.
TANG Boming. Application of falling weight deflectometer in evaluation of pavement structural conditions[D]. Nanjing: Southeast University. School of Transportation, 1990.
- [6] Westergaard H M. Computation of stresses in concrete roads[J]. Proceedings, HRB, 1925, 5(1): 90.
- [7] Kelly E F. Application of the results of research to the structural design of concrete pavements[J]. Public Roads, 1939, 20(5):107.
- [8] Pickett G. Concrete pavement design[R]. Skokie: Portland Cement Association, 1946.
- [9] 姚祖康.水泥混凝土路面设计理论和方法[M].北京:人民交通出版社,2003.
YAO Zukang. Theory and method of cement concrete pavement design[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [10] 赵军,唐伯明,谈至明,等.基于弯沉指数的水泥混凝土路面板角脱空识别[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(3): 335.
ZHAO Jun, TANG Boming, TAN Zhiming, et al. Identification of void beneath cement concrete slab corner based on deflection index[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(3): 335.
- [11] 周玉民,谈至明,刘伯莹.水泥混凝土路面脱空状态下的荷载应力[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(2): 341.
ZHOU Yumin, TAN Zhiming, LIU Boying. Loading stresses in cement concrete pavement slab with void underneath[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(2): 341.
- [12] 谈至明,熊军,朱晶.移动集中力作用下的局部脱空地基梁的振动[J].应用力学学报,2007,24(1): 137.
TAN Zhiming, XIONG Jun, ZHU Jing. Vibration of foundation beam with local void moving concentrated load[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(1): 137.
- [13] 谈至明,刘伯莹,唐伯明.水泥混凝土路面断板的原因分析[J].公路,2005,12: 63.
TAN Zhiming, LIU Boying, TANG Boming. Analysis of contrast experiments on erosion stability of red bed soft rock slope with and without vegetation protection[J]. High Way, 2005, 12: 63.
- [14] 唐伯明.刚性路面板脱空状况的评定与分析[J].中国公路学报,1992,5(1):40.
TANG Boming. Evaluation and analysis for rigid pavements under void conditions[J]. The Journal of China Highway, 1992, 5(1):40.
- [15] 孙朝云.现代道路交通测试技术原理与应用[M].北京:人民交通出版社,2000.
SUN Chaoyun. Theory and application of modern road and traffic testing technique[M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [16] 曹东伟.水泥混凝土路面板底脱空判别方法研究[J].西安公路交通大学学报,1998(3):239.
CAO Dongwei. Research on determining whether the cavity beneath cement concrete slabs occurred[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998(3): 239.