

# 脱空对机场水泥混凝土道面荷载应力的影响

谭悦, 凌建明, 袁捷, 徐柱杰

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 提出了通过建立 ABAQUS 三维有限元模型, 将计算弯沉盆与实测弯沉盆对比, 得到较为精确的计算脱空参数的方法, 并计算了机场水泥混凝土道面板底不同脱空程度对道面板荷载应力的影响. 计算结果表明: 有限元软件计算道面弯沉中, 以静载代替脉冲荷载对计算结果影响很小; 脱空区域基础与面层并非完全脱离, 其反应模量较原值有一定折减; 在严重脱空区域, 道面荷载应力较未脱空时可增大 80%.

**关键词:** 机场道面; 脱空; 三维有限元; 弯沉盆曲线; 荷载应力

**中图分类号:** U 416.216

**文献标识码:** A

## Influence of Voids to Loading Stresses of Airport Cement Concrete Pavement

TAN Yue, LING Jianming, YUAN Jie, XU Zhujie

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on the ABAQUS 3D-FEM model and the comparison of the test deflection basin curve and the calculated deflection basin curve, a more precise method is proposed to calculate void parameters. An analysis is made of the influence of different voids to loading stresses of the airport cement concrete pavement. The result shows that in finite element software calculation pavement deflection, the replacement of pulse load by static load has little effect on the calculation results, the subgrade of void region is not completely divorced from the surface, and its response modulus has certain discount from original value, influence of void to loading stresses of airport cement concrete pavement reaches to 80%.

**Key words:** airport pavement; void; 3D finite element method; deflection basin curve; loading stresses

考虑脱空影响的水泥混凝土道面荷载应力计算非常复杂. 相关研究开始较早, 如 1939 年 E. F. Kelley 提出了地基局部脱空下的板角、板边应力经验公式<sup>[1]</sup>, 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<sup>[2]</sup>等, 但由于理论计算的复杂性与局限性, 这方面研究遇到瓶颈. 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<sup>[3-8]</sup>. 研究成果使人们对脱空应力的计算有了较为科学的方法, 但这些研究在对脱空模拟时, 大多假定脱空区域基础与面层完全脱离, 即先预设一个脱空量, 然后取脱空区域基础反应模量值为零. 研究发现, 脱空区域基础大多只是一定程度的细集料流失, 对道面仍有一定的支撑作用, 基础反应模量只是在初始值上有一定折减. 如取零, 计算结果偏于保守. 同时, 以上研究并未提出较好的确定脱空区域尺寸的方法.

为了更为精确地模拟道面板底脱空的真实状态, 本文中借助有限元软件, 通过建立三维有限元模型, 初拟脱空参数, 将计算弯沉盆与实测弯沉盆对比, 通过不断调整脱空参数试算, 最终得到较为精确的板底脱空参数, 包括基础反应模量折减系数、脱空区域尺寸及脱空类型(即单侧或两侧脱空). 同时, 对不同脱空程度对道面荷载应力的影响作详细分析.

## 1 重型落锤弯沉测试

重型落锤式弯沉仪 (high weight deflector, HWD) 是机场水泥混凝土道面进行无损结构测试的先进设备, 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. 在机场道面结构检测中, 应用最为广泛的是脉冲类弯沉检测设备, 主要原因是

收稿日期: 2009-02-20

作者简介: 谭悦(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为路基路面及机场工程. E-mail: tanyue5228081@yahoo.com.cn

凌建明(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为路基路面及机场工程. E-mail: jmling01@yahoo.com.cn

该类设备不仅能够提供多点弯沉(弯沉盆)信息,而且现场测试速度快、荷载级位调整方便、加载形式与轮载-道面相互作用形式吻合较好.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、测点位置的布置等方面.HWD弯沉测试示意图如图1所示,图中 $D_0 \sim D_7$ 表示测点.

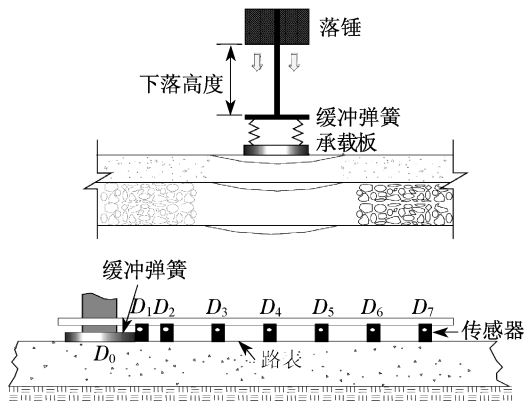


图1 重型落锤弯沉测试示意图

Fig.1 Model of high weight deflector test

## 2 有限元模型介绍

以 ABAQUS V6.6 通用有限元程序为计算平台,

选取 HWD 弯沉检测中脱空情况较为严重的板块 A 为算例.该板块 HWD 测试数据如表 1 所示.A 板块板边存在严重唧泥,说明该板接缝处板底存在脱空.本文将实测弯沉盆曲线与计算弯沉盆曲线进行对比,通过改变脱空参数反复试算来确定实际脱空参数,再以此模型和参数计算荷载应力.

表1 A板重型落锤测试数据

Tab.1 A slab's high weight deflector test data  $\mu\text{m}$

$D(0)$	$D(1)$	$D(2)$	$D(3)$
430.00	441.50	140.00	119.00
$D(4)$	$D(5)$	$D(6)$	$D(7)$
101.50	86.00	72.00	59.00

注: $D(i)$ 表示第 $D_i$ 测点处的弯沉值.

水泥混凝土面层尺寸为 $5.0\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ ,三维有限元模型考虑2块水泥混凝土板,模型尺寸为 $5.00\text{ m} \times 9.00\text{ m} \times 0.32\text{ m}$ ,采用 C3D20R 单元,模型如图 2a;两块板横向之间设弹簧单元(Special→Springs/Dashpots),设置位置如图 2b,不考虑横缝的宽度.

横缝断面方向弹簧设置位置如图 3,弹簧刚度按长度方向分配,共有 9 列,见图中序号①~⑨.每列各 3 个节点,分别位于板顶、板中、板底位置,同一列上 3 个节点的弹簧刚度相同,纵缝断面上共有 27 个节点上设置弹簧单元,其刚度如表 2.

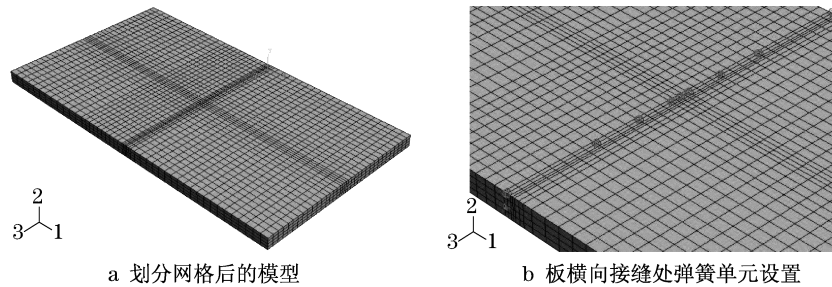


图2 有限元模型

Fig.2 Schematic drawing of 3D finite element methods

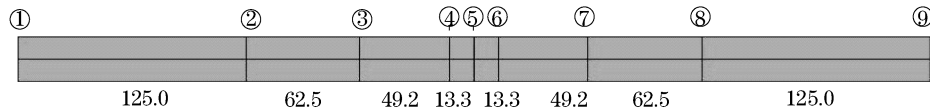


图3 横缝处节点弹簧设置示意图(单位:cm)

Fig.3 Schematic drawing of nodes spring set in transverse joints(unit:cm)

表2 A板有限元模型接缝弹簧刚度分配

Tab.2 Allocation of spring stiffness in A slab's 3D-FEM model

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
距板中距离/cm	250.0	125.0	62.5	13.3	0	13.3	62.5	125.0	250.0
节点弹簧刚度/( $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	33.6	25.2	15.0	8.4	3.6	8.4	15.0	25.2	33.6

模型边界条件:水泥混凝土板以下考虑为K地基,边界条件为限制水平方向位移。

HWD荷载条件:承载板半径为15.0 cm,将圆形荷载换算为正方形荷载,其边长为26.6 cm,荷载为

145 kN.弯沉测试车7个传感器位置布置如图4,①~⑦号传感器间距依次为10,30,30,30,30,30 cm.荷载中心距接缝距离为25 cm.

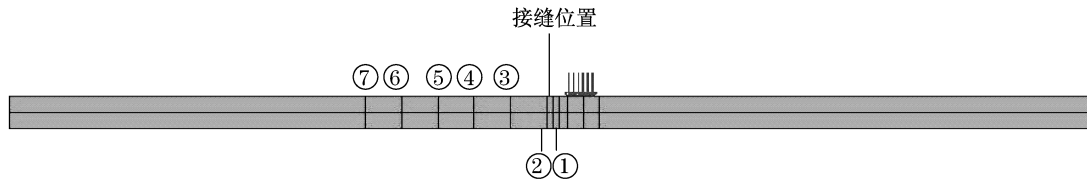


图4 重型落锤式弯沉测试传感器布设示意图

Fig.4 Schematic drawing of sensors emplaced in high weight deflector test

通过对HWD测试数据进行整理与反演分析<sup>[9]</sup>,可得板块结构参数:板块弹性模量为42 GPa,相对刚度半径为1.09 m,基层反应模量为 $83 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ .

### 3 静载代替动载的误差分析

HWD实测荷载为周期30 ms的半正弦波脉冲荷载,荷载级位由提升高度控制.机场测试荷载多为14~20 t.

由于使用ABAQUS在对结构作动力学分析时,

需将荷载函数转换为傅里叶级数形式,还需考虑道面本身的密度、质量、阻尼等,同时相关分析步的设定与计算结果的提取也较为繁琐.因此,ABAQUS的动力学分析较静力学分析的复杂程度大为增加.为使此方法的应用更为简便,本文中先对在ABAQUS计算水泥混凝土道面板弯沉时以静载代替脉冲荷载所产生的误差进行分析,如误差非常小,则计算中将采用静载来代替HWD实测的脉冲荷载.计算参数如第2节所示,不考虑基础脱空,荷载(峰值)为145 kN,道面板计算弯沉如表3所示.

表3 静荷载与脉冲荷载的计算弯沉

Tab.3 Calculated deflection of static load and pulse load

测点	弯沉/ $\mu\text{m}$		误差/%	测点	弯沉/ $\mu\text{m}$		误差/%
	静载	脉冲荷载			静载	脉冲荷载	
$D_0$	385	375	2.67	$D_4$	143	142	0.70
$D_1$	404	395	2.28	$D_5$	110	112	1.79
$D_2$	230	225	2.22	$D_6$	83	85	2.35
$D_3$	188	180	4.44	$D_7$	59	61	3.28

由表3可以看出,用静载代替脉冲荷载对道面板计算弯沉的影响很有限,最大不超过5%,在可接受范围内.因此,在下文中将以静载来代替脉冲荷载.

### 4 脱空参数判定

道面板底脱空参数包括:脱空区域形状、类型、尺寸及反应模量折减系数.通常先根据经验和现场情况,假定脱空形状,通常板边为矩形、板角为三角形.再初拟其他脱空参数进行试算,将计算弯沉盆曲线与实测弯沉盆曲线进行对比,通过对参数不断调整,最终得到较为准确的脱空参数.拟合精度根据需要确定.

本文中先假定脱空形状为矩形.初拟脱空区域横向尺寸为板宽5.00 m,纵向尺寸为0.25 m,对脱空区域基础反应模量折减系数分别取1.00,0.75,0.50,0.25,0,并考虑脱空类型为接缝单侧脱空和接缝两侧脱空,由此可计算得到各种条件下的弯沉盆,再与实测弯沉盆对比,如拟合结果较差,则调整脱空参数再进行计算.取与实测弯沉盆最接近的曲线所对应的参数为实际脱空参数,并以此作为下一步荷载应力计算的参数.图5为部分弯沉对比曲线.

由图5可见:当有限元模型采用接缝单侧脱空、脱空尺寸为 $30 \text{ cm} \times 500 \text{ cm}$ 、基础反应模量折减系数为0.25时,有限元模型得到的弯沉盆曲线与实测弯沉盆曲线最吻合,从而确定该板板底脱空参数.

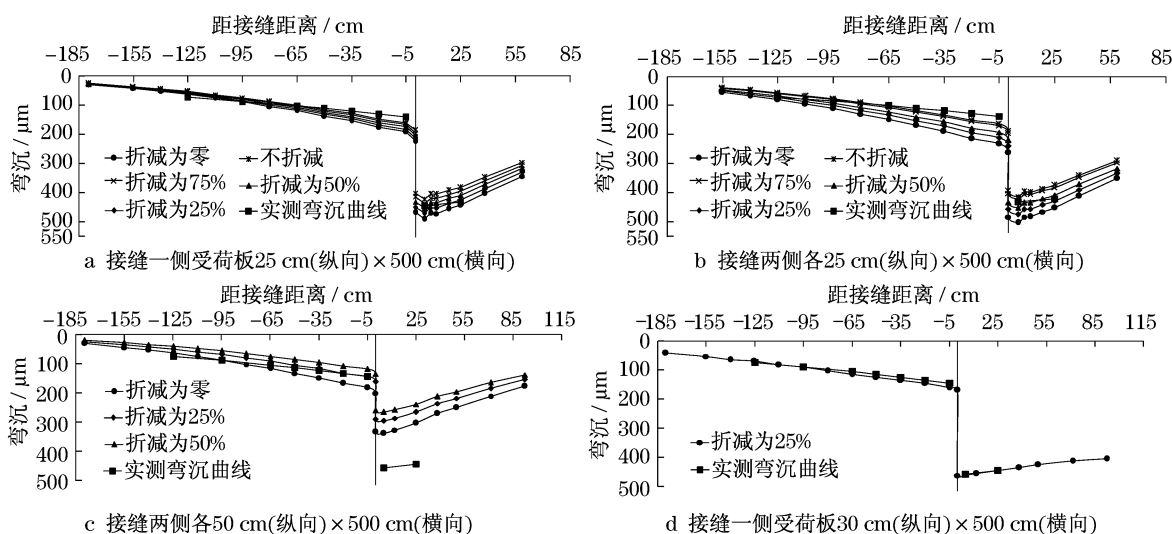


图5 实测弯沉盆与有限元计算弯沉盆对比

Fig.5 Comparison between test and the calculated deflection basin curve

需要进一步指出的是,依据《MH/T5024—2009 民用机场道面评价管理技术规范》的规定,接缝传荷系数为  $D(2)$  与  $D(1)$  的比值,计算得到该板接缝传荷系数为 32%. 由于  $D(1)$  与  $D(2)$  位置传感器在理想测试条件下分别距离接缝 5 cm,所以测试得到的接缝传荷系数存在一定误差. 通过有限元软件拟合后可得到接缝传荷系数为 38%. 因此,如需得到精确的接缝传荷系数,可采用有限元软件拟合得到.

在处理实际工程问题时,确定脱空区域参数要注意以下几个问题:

(1) 脱空区域基础与面层并非完全脱空,其反应模量较原值有一定折减. 折减系数可通过上文提供的方法计算得到. 如取折减系数为零,计算结果偏于保守. 由于板底基础抗冲刷能力不足,在动水压力的反复作用下出现集料的流失,导致基础对面层支撑不足. 通过实际的钻芯取样发现脱空处基础呈现蜂窝状,仍具备一定的模量残值.

(2) 脱空区域形状可依据现场调查和经验判断. 通常采取的形状有矩形、圆弧形、三角形、梯形及复合形式.

(3) 板边脱空类型分为接缝单侧、双侧脱空,板角脱空通常认为存在单板、双板、四块脱空 3 种可能. 可通过有限元软件拟合来判定,也可根据 HWD 测试等判定.

### 5 计算道面板荷载应力

设计机型取 B767-200,其荷载参数见表 4. 临界

荷位取横缝板边中央. 轮载分布与临界荷位作用位置如图 6 所示.

表 4 B767-200 的荷载参数  
Tab.4 B767-200's load parameters

主要参数	数值
最大起飞重量/kN	1 410
主起落架个数 $n_c$ /个	2
机轮数 $n_w$ /个	4
主起落架荷载分配系数 $p$	0.95
主起落架单轮荷载 $P_s$	167.4
胎压/MPa	1.31
轮印面积/ $m^2$	0.125
轮印尺寸/( $m \times m$ )	0.293 $\times$ 0.425
轴距/m	1.420
同轴轮距/m	1.140

注:轮印尺寸按面积等效转换为矩形.

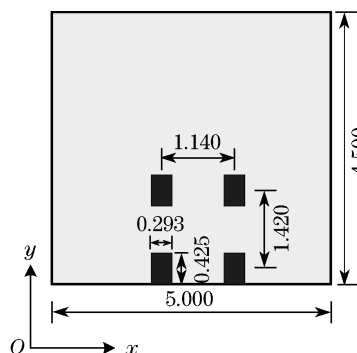


图6 B767-200 主起落架轮载作用位置(单位:m)

Fig.6 Position of B767-200's main landing gear wheel load on the slab(unit:m)

采用 ABAQUS V6.6 有限元软件进行计算,在以 B767-200 主起落架为外荷载作用下,对考虑横缝脱

空和不考虑横缝脱空情况分别计算出道面板荷载应力,其最大值分别为 2.52 MPa 和 2.18 MPa. 由此可见,在本例中,不考虑脱空影响导致道面板荷载应力计算误差达 16%,且该误差会随着脱空面积、脱空程度的增大而增大. 这对机场道面结构性能评价(如道面的剩余寿命预估、道面适应性厚度及 ACN-PCN 评价等)及道面加铺设计结果会有较大影响. 图 7 为考虑脱空影响下的板边应力计算云图.

为进一步研究板底不同程度脱空对机场水泥混凝土道面板荷载应力的影响,现计算板底存在较为严重脱空时的荷载应力,再与不考虑脱空时的荷载应力计算结果进行对比. 取板边脱空尺寸为  $0.5\text{ m} \times 5.0\text{ m}$ ,板角脱空尺寸为  $0.5\text{ m} \times 2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ . 图 8 为道面板块脱空区域示意图. 对脱空区域基层模量折减系数分别取 0.50, 0.25, 0. 计算参数同本文前例. 此外,对板边、板角同时存在脱空情况进行分析.

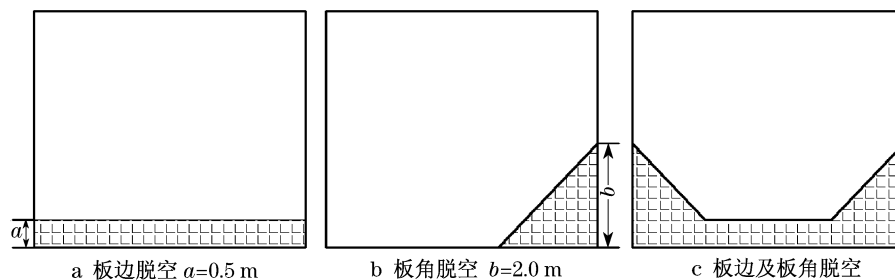


图 8 脱空区域尺寸示意图

Fig.8 Schematic drawing of void region size

表 5 板底脱空与未脱空的荷载应力比

Tab.5 Loading stress ratio of slab with void underneath and slab without void

脱空部位	$\beta^{1)} = 0.50$	$\beta = 0.25$	$\beta = 0$
板边脱空	1.08	1.13	1.24
板角脱空	1.11	1.21	1.35
组合 1 <sup>2)</sup>	1.12	1.31	1.48
组合 2 <sup>3)</sup>	1.18	1.53	1.80

注:1) $\beta$ 为脱空区域基础反应模量折减系数;2)板边、板角同时脱空时荷载作用于板边位置的计算结果;3)板边、板角同时脱空时荷载作用于板角位置的计算结果.

从表 5 可以看出,当板底存在严重脱空时,道面板荷载应力较未脱空时增大 80%. 因此,是否考虑脱空将直接决定计算结果的正确性与适用性. 由此可见,对脱空较严重的区域,在计算其道面板荷载应力时必须恰当地考虑脱空影响.

## 6 结论

(1) 用有限元软件计算水泥混凝土道面弯沉

板边脱空模型为道面纵向前后 2 块板,板角脱空模型为板角相邻 4 块板. 用脱空与未脱空的计算荷载应力比值来表征影响大小. 分析结果如表 5 所示.

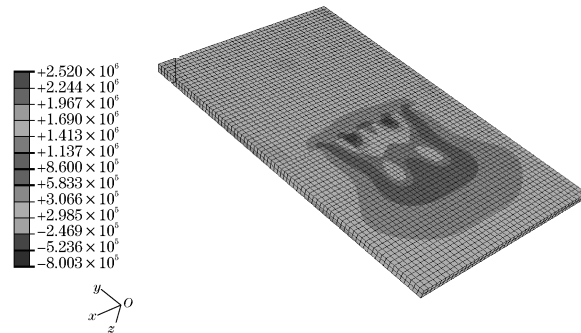


图 7 A 板考虑脱空荷载应力计算云图(单位:Pa)

Fig.7 A slab's loading stress calculation cloud chart with consideration of void(unit:Pa)

时,以静载代替脉冲荷载对计算结果影响很小.

(2) 脱空区域基础与面层并非完全脱离,其反应模量较原值有一定折减.

(3) 脱空区域基础反应模量折减系数、脱空尺寸及脱空类型等脱空参数,可以通过建立有限元模型试算得到较为精确的结果.

(4) 计算表明,当板底存在严重脱空时,道面板荷载应力较未脱空时增大 80%.

本文关于脱空参数的求解方法同样适用于公路水泥混凝土路面. 在计算脱空对荷载应力的影响时,由于采用的是飞机荷载,分析结果仅适用机场水泥混凝土道面. 由于在计算中选取的荷载及道面结构类型有限,计算结果有一定局限性.

## 参考文献:

- [1] Kelly E F. Application of the results of research to the structural design of concrete pavements[J]. Public Roads, 1939, 20(5): 107. (下转第 568 页)