

# 基于弯沉盆的半刚性基层脱空判识方法

陈南<sup>1</sup>, 曹长伟<sup>2</sup>, 凌建明<sup>1</sup>, 魏宏<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011)

**摘要:** 建立了基层脱空路面3维动力学模型, 分析了脱空范围、脱空高度、基层开裂情况对弯沉盆的影响规律, 并且比较了基层脱空和其他基层损坏的弯沉盆异常响应特征。通过相关性分析, 提出采用弯沉比和面积指标作为基层脱空判定指标, 并且提出了相应的判定标准。最后, 根据结构层缺陷弥散假设, 分析了脱空面积与土基等效模量损失之间的关系, 建立了估算脱空面积的经验回归模型。

**关键词:** 沥青路面; 基层脱空; 动力学分析; 结构响应; 弯沉盆参数; 脱空面积估算

**中图分类号:** U416

**文献标志码:** A

## Identification Method of Semi-rigid Base Disengagement Based on Deflection Basin

CHEN Nan<sup>1</sup>, CAO Changwei<sup>2</sup>, LING Jianming<sup>1</sup>, WEI Hong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Road and Bridge Corporation, Beijing 100011, China)

**Abstract:** A 3D finite element model of a base-disengaging pavement structure was built for dynamic analysis. The effects of disengaging area, gap height and base cracking on deflection basin were analyzed and characteristics of deflection basin for a base-disengaging structure were compared with other base damages. According to a correlation analysis,  $DR_t$  and  $AREA_t$  were proposed as judging index for identification of base-disengagement. Based on an assumption of defects dispersion, relationship between disengaging area and equivalent modulus decrease was analyzed and an empirical model in estimating disengaging area was put forward.

**Key words:** asphalt pavement; base disengagement; dynamic analysis; structure response; deflection basin parameters; estimation of disengaging area

空路面结构局部受力原理近似于简支梁, 行车荷载  $P$  作用下基层底面产生较大弯拉应力, 容易引起基层疲劳开裂, 从而影响路面结构使用性能(图1)。因此, 研究半刚性基层脱空的判识方法对公路病害检测及养护维修具有重要意义。

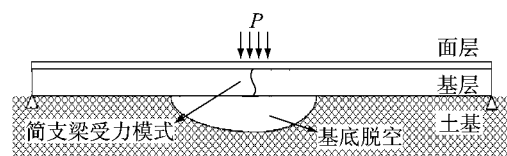


图1 基层脱空路面受力原理

Fig.1 Stress mechanism of a base-disengaging pavement

探地雷达(GPR)能探测结构层中的空洞与层间分离, 但由于受到分辨率的制约, 探测精度需要进一步提高<sup>[1]</sup>。研究人员根据电磁波特性推导经验回归公式来估算脱空范围等参数<sup>[2]</sup>, 但是结果的误差较大, 不能满足工程应用的要求。近年来国内外学者对破损路面结构弯沉盆特性进行了研究, 提出了一些基于弯沉盆参数的路面结构层缺陷判识方法。Yung-Chieu Lee<sup>[3]</sup>提出利用形状参数  $F_2$  和面积指标评价路面损坏状况。Y. R. Kim 等<sup>[4]</sup>发现 BDI(基层损坏指标)可以较好地反映水泥稳定基层的损坏状况, 并指出当 BDI 小于 2.5 时基层为完好状态, 反之为开裂状态。谭悦<sup>[5]</sup>在借鉴现有的基于重锤式弯沉仪(FWD)的刚性路面脱空判定指标基础上, 提出采用弯沉比法和截距法作为水泥道面脱空判定方法。姚祖康等学者提出可以将路面结构缺陷均匀“弥散”于材料中, 其结果仅造成材料的等效模量的损伤, 并且根据这一假设建立了损坏程度与模量损伤值的对应关系<sup>[6]</sup>。根据以上研究现状, 路面结构脱空的判识需要采用更合理的方法来进一步提高判识率和精准度, 还要求能够对脱空范围进行较准确的判识。本文

脱空是半刚性基层沥青路面典型结构缺陷。脱

收稿日期: 2013-06-18

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA112505)

第一作者: 陈南(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为路基路面工程。E-mail: tjchennan@qq.com

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

基于已有研究成果,通过建立沥青路面结构动力学模型,对基层脱空条件下弯沉盆异常特征进行分析,提出基于 FWD 弯沉盆参数的基层脱空判识指标及标准,并且建立脱空范围的估算模型。

## 1 基层脱空沥青路面动力分析模型

本文采用的 3 维模型尺寸为  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 10\text{ m}$ ,路面结构层的厚度采用文献中常用的取值范围,分别取面层  $15 \sim 30\text{ cm}$ ,基层  $40 \sim 60\text{ cm}$ 。假定完好路面各层材料为均匀连续各向同性,服从胡克定律;最下层为半无限体或者刚性约束;层间状态均为连续;荷载作用于模型中央,且为轴对称。在土基顶面构建脱空区来模拟实际的层间脱离(图 2)。脱空区假定为长立方体,长边贯穿整个模型的宽度范围,通过调整短边长度来调节脱空面积(脱空区短边在  $0 \sim 1.5\text{ m}$  范围内取值),脱空高度分别取  $1, 3, 5\text{ cm}$  共 3 种情况进行分析。

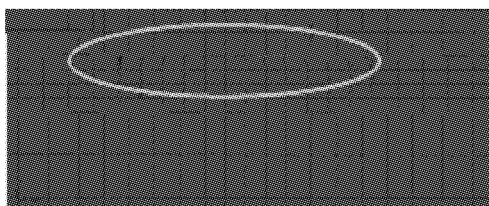


图 2 脱空区的模拟

Fig.2 Disengaging area in models

基层完好是脱空形成和维持的前提条件,但是当脱空区上方的基层出现疲劳开裂时,板体整体性开始破坏。为了对这种情况进行分析,本文模拟脱空区上方基层出现贯穿开裂的情况(图 3)。除了脱空以外,基层结构也可能出现其他损坏。由于损坏类型、损坏程度及损坏范围的差异性及其复杂性,建模分析每一种情况是十分困难的,也是没有必要的。因此,本文只针对工程中最常见的基层开裂和基层松散两种典型损坏类型进行模拟。基层开裂通过构造 1 条基层横向贯穿裂缝来实现,裂缝宽度由  $2 \sim 14\text{ mm}$

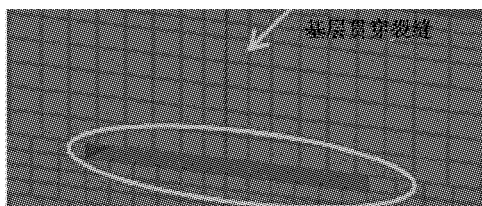


图 3 脱空基层贯穿裂缝的模拟

Fig.3 Penetrating cracking of disengaging base in models

不等。基层松散则通过设置松散区宽度和结构层模量衰减系数来实现。

本文以 PRI 2100 型 FWD 测试设备为依据,将 FWD 产生的冲击荷载利用半正弦曲线来描述,如式(1)所示。荷载作用半径为  $15\text{ cm}$ ,在模型中采用正方形区域取代圆形区域。

$$p(t) = p_{\max} \sin\left(\frac{t}{T}\pi\right) \quad (1)$$

式中: $t$  为荷载作用时间; $T$  为荷载作用周期,取为  $0.03\text{ s}$ ;  $p_{\max}$  为荷载作用峰值,取为  $0.707\text{ MPa}$ 。

阻尼是路面结构动力响应分析的重要参数之一,许多学者对其取值进行了研究分析。根据文献[7]在分析时采用的路面结构阻尼比  $\zeta$  为  $0.05$ ,计算 Rayleigh 阻尼比例系数  $\alpha = 2.532 \times 10^{-5}$ ,  $\beta = 3.082 \times 10^{-3}$ 。路面结构层采用弹性层状体系中弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$  进行表征,路基土采用理想 Drucker-Prager 本构模型来表征其弹塑性行为,并符合相关性流动法则。本文在借鉴参考文献研究成果的基础上,初步拟定了各结构层的材料动态模量,以及密度  $\rho$ ,黏聚力  $c$  及内摩擦角  $\varphi$ ,如表 1 所示。

表 1 模型主要参数取值

Tab.1 Parameters values in models

结构层	$E/\text{MPa}$	$\mu$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$\zeta$
面层	4 800	0.30	2 200	—	—	0.05
基层	5 000	0.35	2 000	—	—	0.05
土基	150	0.40	1 800	18	25	0.05

## 2 基层脱空弯沉盆异常响应特征

采用所建立的有限元模型对不同脱空范围、不同脱空高度以及不同基层损坏条件下共计 54 组工况进行了弯沉计算,各分析工况如表 2 所示。

表 2 分析工况

Tab.2 Detail information of analysis cases

工况	损坏参数	层间接触
基层完好 层底脱空	脱空范围为 $0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5\text{ m}$ ; 脱空高度为 $1, 3, 5\text{ cm}$	全部连续
贯穿裂缝 层底脱空	脱空参数同上,裂缝宽度为 $5\text{ mm}$	全部连续
不脱空 贯穿裂缝	裂缝宽度为 $2, 6, 10, 14\text{ mm}$	基-面间连续, $\mu=0.2$ , 滑动
不脱空 基层松散	松散范围为 $2, 4, 6, 8, 10\text{ m}$ ; 模量折减系数为 $0.10, 0.25, 0.50, 0.75$	全部滑动

### 2.1 脱空参数对弯沉盆的影响

脱空高度为  $1\text{ cm}$  及  $3\text{ cm}$ ,不同脱空范围弯沉盆形态特征如图 4 及图 5 所示;脱空范围为  $0.9\text{ m}$  及  $1.5\text{ m}$ ,不同脱空高度的弯沉盆形态特征如图 6 及图

7 所示。

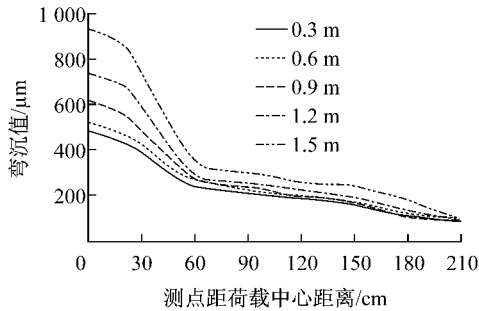


图4 脱空高度为1 cm,不同脱空范围弯沉盆特征  
Fig.4 The height is 1 cm, characteristics of deflection basin of various  $b$

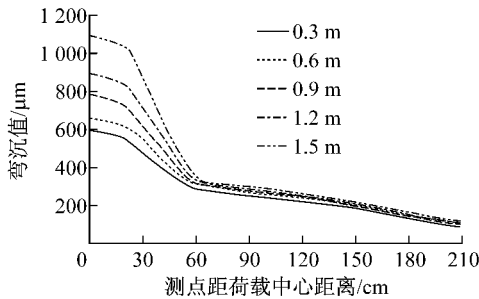


图5 脱空高度为3 cm,不同脱空范围弯沉盆特征  
Fig.5 The height is 3 cm, characteristics of deflection basin of various  $b$

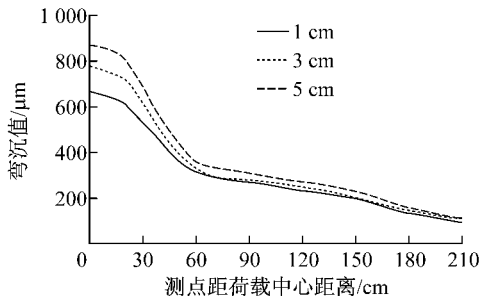


图6 脱空范围为0.9 m,不同脱空高度弯沉盆特征  
Fig.6 The width is 0.9 m, characteristics of deflection basin of various  $h$

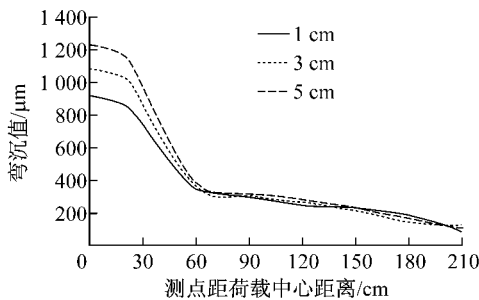


图7 脱空范围为1.5 m,不同脱空高度弯沉盆特征  
Fig.7 The width is 1.5 m, characteristics of deflection basin of various  $h$

从图中可以看出,脱空范围对弯沉盆形态及各点弯沉均有显著的影响.随着脱空范围的增大,中心点弯沉明显增大,远端测点弯沉值也有一定程度的增大.然而,当脱空范围一定时,脱空高度对弯沉盆的影响较小,随着脱空高度的增大,离荷载中心点较近的测点(30 cm 以内)弯沉略有增加,而较远测点弯沉值变化不大.这说明,与脱空范围相比,脱空高度对弯沉盆的影响较为轻微,尤其是对于较远测点的弯沉影响几乎可以忽略.

## 2.2 脱空基层开裂对弯沉盆的影响

脱空范围为0.6 m及1.2 m时,基层贯穿开裂与基层完好情况下弯沉盆比较如图8及图9所示.从图上可以看出,基层损坏情况对于弯沉盆影响显著,尤其是近端测点的弯沉值在基层完好时的弯沉值相对较小,而基层损坏时出现了弯沉值陡升.

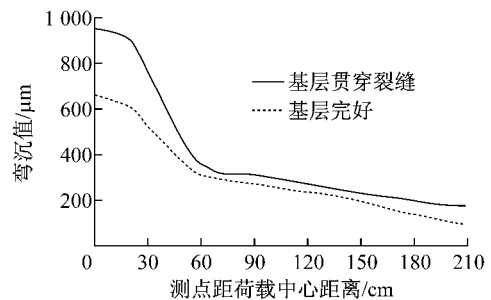


图8 脱空范围为0.6 m,基层贯穿裂缝对弯沉盆影响  
Fig.8 The width is 0.6 m, effects of penetrating crack on deflection basin

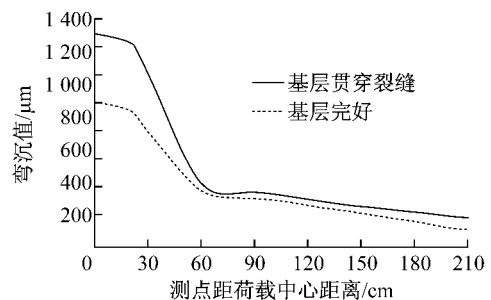


图9 脱空范围为1.2 m,基层贯穿裂缝对弯沉盆影响  
Fig.9 The width is 1.2 m, effects of penetrating crack on deflection basin

基层贯穿裂缝对于脱空处路面弯沉盆的影响可以根据脱空机理进行解释:基层完好时,脱空处的路面结构可以简化为简支梁.当基层出现贯穿裂缝时,板体在局部的受力方式由简支梁向悬臂梁转化,结构受力方式的改变使得同等荷载作用下路面结构挠度出现了增加.脱空基层开裂使得路面结构承载力进一步减弱,是路面跟随变形开始的标志.

### 3 基于弯沉盆的基层脱空判别方法

根据弯沉计算结果,将基层脱空和基层开裂的弯沉盆进行比较,发现两种情况下弯沉值变化范围及弯沉盆形态都存在明显区别.各测点基层脱空的弯沉值都要明显大于基层开裂的情况.从弯沉盆形态上看,基层脱空弯沉值普遍呈现陡升的趋势,而基层开裂弯沉盆各测点弯沉变化趋势比较平缓.将基层脱空和基层松散的弯沉盆进行比较,发现两种情况下的弯沉值变化范围存在一定的交集.从弯沉盆形态上看,基层松散的各测点弯沉盆表现出明显错断和不连续的形态,松散范围越大,松散越严重,弯沉盆不连续的程度也越大.因此,本文将尝试提出弯沉盆形态表征指标来区分和判别各种基层缺陷类型.

选取合适的评价指标是判别脱空的关键.本文筛选 5 类指标(曲率指标、斜率指标、形状指标、面积指标及弯沉比指标)进行相关性分析.根据相关性分析结果采用弯沉比指标( $DR_4$ )以及面积指标( $AREA_4$ )作为基层脱空判定指标.

#### 3.1 基层脱空判定指标及标准

将不同脱空工况的弯沉比指标  $DR_4$  以及面积指标  $AREA_4$  的关系进行了拟合回归,并绘制成散点图,如图 10 所示.

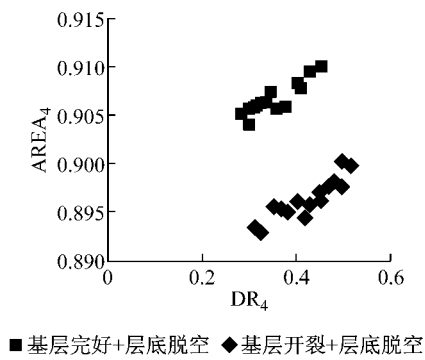


图 10 基层脱空  $DR_4$ - $AREA_4$  散点图

Fig. 10 Scatter diagram of  $DR_4$ - $AREA_4$  of disengagement

从图 10 可以看出,不同脱空工况得到的弯沉比  $DR_4$  的范围基本在 0.5 以内,基层开裂状况与  $DR_4$  的分布范围没有明显的规律,因此仅由  $DR_4$  指标很难区分脱空基层是否开裂.脱空条件下面积指标  $AREA_4$  分布能够较好地体现基层损坏情况,其中“基层完好+层底脱空”的  $AREA_4$  基本小于 0.9,而“基层开裂+层底脱空”的  $AREA_4$  普遍大于 0.9.

为了进一步对比分析其他基层损坏与脱空条件下  $DR_4$  及  $AREA_4$  的分布特征,将基层开裂及基层松散的  $DR_4$  及  $AREA_4$  计算结果绘成散点图,如图 11 所示.

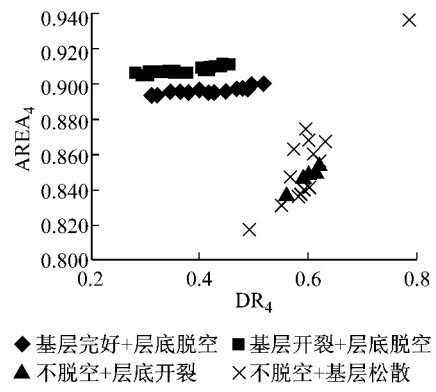


图 11 基层损坏  $DR_4$ - $AREA_4$  散点图

Fig. 11 Scatter diagram of  $DR_4$ - $AREA_4$  of base damages

从图 11 可以看出,基层脱空与基层开裂及松散条件下  $DR_4$  及  $AREA_4$  的值分别处在不同的区域范围内.基层开裂情况下, $DR_4$  指标的范围为  $[0.559, 0.626]$ , $AREA_4$  指标的范围为  $[0.836, 0.854]$ ;非脱空基层松散情况下, $DR_4$  指标的范围为  $[0.494, 0.859]$ , $AREA_4$  指标的范围为  $[0.817, 0.984]$ .由此可见,采用  $DR_4$  及  $AREA_4$  指标可以将基层脱空与其他基层损坏区分开来.综上所述,半刚性基层层底脱空与  $DR_4$  及  $AREA_4$  指标间具有较为明确的对应关系,并且可以将脱空与其他基层损坏进行区分.因此,可以基于上述指标对沥青路面半刚性基层脱空进行判定,判定标准如表 3 所示.

表 3 基层脱空判定指标及标准

Tab. 3 Index and criterion of disengagement identification

基层脱空类型	判定指标及标准
基层完好	$DR_4 \leq 0.5, AREA_4 \leq 0.9$
基层开裂	$DR_4 \leq 0.5, AREA_4 < 0.9$

#### 3.2 基层脱空面积估算方法

文献 [6] 认为存在缺陷的路面也可视作连续体,不考虑缺陷的分布,而是认为缺陷均匀“弥散”在材料当中,然后通过等效降低材料模量的方式(损伤模量)表征缺陷的严重程度.本文将基层底面脱空弥散至土基(或土基与垫层)的材料中,然后建立土基等效模量损失与脱空面积之间的关系,对基层脱空面积进行估算.文献 [7] 认为 FWD 的第 6 传感器对应的综合模量可视为土基等效模量,第 5 传感器对

应的综合模量可视为垫层与土基的等效模量,第3传感器对应的综合模量可视为基层、垫层以及土基的等效模量,第1传感器对应的综合模量可视为面层、基层、垫层以及土基的等效模量.各点弯沉所对应的综合模量计算方法见文献[7].

根据以上原理,基层底面脱空主要对第6测点弯沉值 $d_6$ 及相应的综合模量 $E_6$ 造成影响.本文将完好路面结构与基层脱空路面结构的第6测点综合模量的差值 $\Delta E_6$ ,作为表征基层脱空造成土基等效模量损失的指标,建立脱空面积与土基等效模量损失 $\Delta E_6$ 的关系.采用建立的脱空路面结构动力分析模型,设定脱空高度为3 cm,计算不同路面结构层厚度组合(面层厚度 $h_{AC}$ ,基层厚度 $h_{BC}$ )及不同脱空面积 $S$ 条件下共计200种工况的路表弯沉盆,并且根据 $d_6$ 计算出相应的综合模量及土基等效模量损失 $\Delta E_6$ .不同路面结构层厚度组合条件下脱空面积 $S$ 与等效模量损失 $\Delta E_6$ 的关系如图12所示.

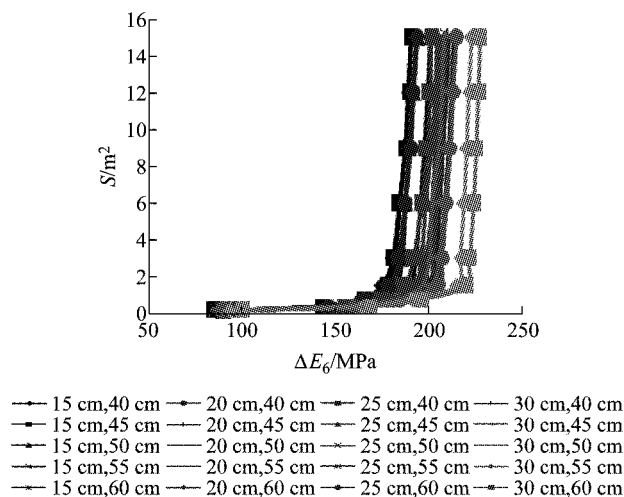


图12 不同结构层厚度组合( $h_{AC}$ ,  $h_{BC}$ )时  $S$ - $\Delta E_6$  关系  
Fig.12  $S$ - $\Delta E_6$  of various heights of structure layers

对 $S$ - $\Delta E_6$ 定量关系进行逐步回归分析,得出如下经验公式模型能够较好地拟合 $\Delta E_6$ 与脱空面积 $S$ 的关系,具体公式如下:

$$S = \frac{a\Delta E_6}{\Delta E_6 + b} \quad (2)$$

式中: $a, b$ 均为回归系数,与结构层厚度相关; $\Delta E_6$ 为基层脱空造成土基等效模量损失.

模型回归系数及相关性如表4所示.

为了便于工程应用,本文进一步建立回归系数 $a, b$ 与路面结构层厚度的对应关系式如下:

$$a = k_{a1}(h_{AC}h_{BC}) + k_{a2}h_{AC} + k_{a3}h_{BC} + k_{a4} \quad (3)$$

$$b = k_{b1}(h_{AC}h_{BC}) + k_{b2}h_{AC} + k_{b3}h_{BC} + k_{b4} \quad (4)$$

通过回归计算可得: $k_{a1} = -1.82$ ,  $k_{a2} =$

$-215.12$ ,  $k_{a3} = -147.99$ ,  $k_{a4} = -71.09$ ;  $k_{b1} = -0.002$ ,  $k_{b2} = -0.19$ ,  $k_{b3} = -0.106$ ,  $k_{b4} = -0.073$ . 回归结果的相关系数 $R^2$ 分别为0.946及0.847,  $F$ 检验结果均为显著相关.

表4 模型回归系数及相关性

Tab.4 Regression coefficients and correlation of the model

结构层厚度		回归系数		相关系数
$h_{AC}/m$	$h_{BC}/m$	$a$	$b$	$R^2$
0.15	0.40	-0.174 1	-193.245	0.996
0.15	0.45	-0.186 5	-194.703	0.993
0.15	0.50	-0.181 3	-197.674	0.994
0.15	0.55	-0.173 6	-211.220	0.994
0.15	0.60	-0.175 6	-215.675	0.993
0.20	0.40	-0.175 5	-196.556	0.995
0.20	0.45	-0.186 0	-197.281	0.995
0.20	0.50	-0.181 7	-205.541	0.992
0.20	0.55	-0.181 1	-214.471	0.994
0.20	0.60	-0.181 7	-218.891	0.996
0.25	0.40	-0.168 3	-205.058	0.993
0.25	0.45	-0.188 7	-209.507	0.992
0.25	0.50	-0.206 6	-212.376	0.992
0.25	0.55	-0.199 6	-216.104	0.994
0.25	0.60	-0.200 8	-221.182	0.995
0.30	0.40	-0.172 0	-212.872	0.997
0.30	0.45	-0.184 6	-213.483	0.994
0.30	0.50	-0.205 9	-220.719	0.995
0.30	0.55	-0.204 5	-230.674	0.993
0.30	0.60	-0.196 1	-235.440	0.995

### 3.3 室内试验验证分析

为了验证以上方法的适用性和正确性,本文进行了室内验证试验.在试槽的横断面处向内挖掘构建脱空区,脱空区上方的路面结构为“沥青面层+半刚性基层”.脱空区挖好后,在洞口处用袋装石料、试块以及填料进行回填支护,然后在脱空区上方进行FWD测试,如图13所示.



图13 基层脱空路面 FWD 测试

Fig.13 A test of FWD above the disengagement

分别在脱空区正上方、正上方偏左侧75 cm以及偏上90 cm处的测点(编号分别为 $D_1$ ,  $D_2$ 及 $D_3$ )进行测试,完好路面结构的测试点标记为P,测试

设备 PRI 2100 型 FWD 与本文建模分析时的假设一致. 根据测点弯沉计算得出的判定指标及判定结果如表 5 所示. 从检验的结果来看,完好路面结构的  $DR_4$  及  $AREA_4$  指标取值与脱空情况下存在较大差异. 荷载作用于脱空上方不同位置时,判定指标的误差较小,因此实际工程应用中只需要合理地确定 FWD 测试点的数量和密度就可以有效地检测出路面结构中的脱空缺陷. 从以上检验结果可以看出,本文提出的基层脱空判定指标及标准是合理的.

表 5 判定指标及标准的检验  
Tab.5 Verification of index and creterion

测点编号	脱空判定指标		判定结果
	$DR_4$	$AREA_4$	
P	0.625	0.852	不脱空
$D_1$	0.443	0.803	基层完好,脱空
$D_2$	0.471	0.817	基层完好,脱空
$D_3$	0.463	0.822	基层完好,脱空

4 结论

(1)脱空面积对接近荷载中心测点的弯沉值影响显著,对远端测点也有一定的影响;而脱空高度对弯沉的影响较小,仅对接近荷载中心的 30 cm 以内的测点有影响,对以外的测点弯沉几乎没有影响.

(2)脱空基层的损坏情况对弯沉有较为明显的影响,当脱空的基层出现贯穿裂缝时,由于板体的整体性开始破坏,会导致弯沉值相对于未损坏情况出现陡升.

(3)基层脱空弯沉盆特征与基层开裂、基层松散的弯沉盆特征区别较为明显. 基层脱空情况下,各点弯沉值均大于基层开裂的情况,而基层松散的弯沉盆与脱空有一定的交集,但是松散情况下弯沉盆形态表现出扭曲的不连续特征,明显有别于脱空的情况.

(4)通过相关性分析,  $DR_4$  及  $AREA_4$  与脱空的相关程度要高于其他指标. 进一步分析各种脱空工况的  $DR_4$  及  $AREA_4$  指标分布特征可知,不同脱空

条件下  $DR_4$  的范围均小于 0.5. 脱空基层开裂与否不能通过  $DR_4$  指标进行区分. 脱空条件下面积指标  $AREA_4$  分布能够较好体现基层损坏情况,其中“基层完好+层底脱空”的  $AREA_4$  均小于 0.9,而“基层开裂+层底脱空”的  $AREA_4$  普遍大于 0.9.

(5)依据结构层缺陷弥散假设,并且结合 FWD 弯沉测试原理,分析了脱空面积  $S$  与土基等效模量损失  $\Delta E_0$  之间的关系. 当结构层厚度变化时,  $\Delta E_0$  与  $S$  的关系呈现出一组变化规律相似的曲线族,并且通过逐步回归的方法,建立了估算脱空面积的经验回归模型.

参考文献:

[1] U S Department of Transportation. AC No: 150/5370-11A Use of Nondestructive testing in evaluation of airport pavements[S]. Washington D C: U S Department of Transportation, 2004.

[2] Tetsuma Toshioka, Tsuneo Tsushida. Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes [J]. Journal of Applied Geophysics, 1995, 33(3): 119.

[3] LEE Yungchien. Condition assessment of Flexible Pavements Using FWD Deflection[D]. [s. n.]: The University of North Carolina, 1998.

[4] Kim R Y, Ranjithan R S. Dynamic analysis-based approach to determine flexible pavement layer moduli using deflection basin parameters[J]. Transportation Research Record, 2002, 1639: 36.

[5] 谭悦. 机场水泥混凝土道面脱空响应及判定方法[D]. 上海:同济大学, 2011.

TAN Yue. Response and identification method of void beneath airport cement concrete pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.

[6] 谢兆星. 破损状态下沥青路面结构层状况评价方法研究[D]. 上海:同济大学, 2009.

XIE Zhaoxing. Evaluation of distressed asphalt pavement layer condition [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.

[7] 丘欣. 基于 FWD 的半刚性基层沥青路面模量参数反演及校正方法[D]. 上海:同济大学, 2009.

QIU Xin. Study on modulus parameter backcalculation and correction method for CTB asphalt pavement based on FWD testing technology [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.