

文章编号:1671-8879(2013)06-0042-07

# 基于 FWD 动态弯沉盆参数的沥青路面 模量反演分析

邱 欣<sup>1</sup>, 杨 青<sup>1</sup>, 游庆龙<sup>2</sup>

(1. 浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321004;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为探讨层间非连续接触行为对半刚性基层沥青路面模量参数反演结果的影响规律,采用动力有限元数值分析方法,利用路表动态弯沉盆参数指标,构建了基于层间完全连续的模量参数反演分析模型,系统地分析了层间非连续接触行为对半刚性基层沥青路面模量参数反演结果的影响规律,提出了充分考虑层间接触状态的模量参数的校正分析方法。分析结果表明:路表动态弯沉盆参数指标与结构层模量参数之间具有良好的相关性;基于路表动态弯沉盆参数指标建立的模量参数反演分析模型具有较高的精度;忽略沥青面层与半刚性基层之间的非连续接触行为,对面层和土基模量的反演结果影响不大,但使基层模量反演结果显著偏低,反演值与理论值的比处于 35%~45%之间;引入层间摩阻系数的基层模量参数的校正分析方法合理可行。研究结果为进一步推广 FWD 在半刚性基层沥青路面路用性能评定中的广泛应用提供了理论和实践依据。

**关键词:**道路工程;沥青路面;落锤式弯沉仪;层间接触;模量反演

中图分类号:U416.223

文献标志码:A

## Back analysis on modulus of asphalt pavements based on FWD dynamic deflection basin parameters

QIU Xin<sup>1</sup>, YANG Qing<sup>1</sup>, YOU Qing-long<sup>2</sup>

(1. School of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China;

2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry  
of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the influence of discontinuous interface contact behavior between asphalt layer and cement treated base layer on back calculation of modulus parameters of asphalt pavements, the finite element analysis was used to create a synthetic database of dynamic deflection basin indicators, with which a regression model was established to back calculate modulus parameters of various structural layers. The effect of the discontinuous interface contact condition between asphalt layer and cement treated base on backcalculation results of modulus parameters was analyzed. A correction analytical method considering the discontinuous interface contact condition was proposed. The results indicate that the dynamic deflection basin indicators are correla-

收稿日期:2013-03-06

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY12E08002)

作者简介:邱 欣(1978-),男,辽宁鞍山人,副教授,工学博士, E-mail:qxqiu@zjnu.cn.

ted with layer modulus parameters. The modulus parameter backcalculation model based on dynamic deflection basin indicators is of high accuracy. The discontinuous layer interface condition has no effect on modulus backcalculation results of asphalt layers and the subgrade structures, but it causes the backcalculation results of base layer modulus to be lower significantly. The ratio of backcalculation value to theoretical values is from 35 to 45%. The correction method of layer moduli can objectively determine the performance condition of various structural layers of asphalt pavements. The research should be useful to popularize FWD testing technology in evaluating the structure performance of asphalt pavements. 7 tab, 3 figs, 15 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; FWD; interface contact; modulus back analysis

## 0 引言

随着落锤式弯沉仪(FWD)检测设备的普及,模量参数的反演分析问题已成为路面结构性能评价中最为关键的技术之一<sup>[1]</sup>。然而,目前各国基于FWD测试技术开发的各种模量反演分析软件(如EVER-CALC, MODULUS, ELMOD等),基本上是以弹性连续层状体系模型和拟静力分析方法为基础,忽略了FWD测试荷载的动力效应以及结构层间非连续的接触行为,且模量参数反演结果缺乏系统有效的校正分析,进而导致反演结果难以客观地表征路面各结构层的实际性能状况<sup>[2-5]</sup>。上述问题对中国常用的半刚性基层沥青路面更为突出,这极大阻碍了FWD测试技术在中国的推广和应用<sup>[6]</sup>。鉴于传统模量反演方法存在的诸多问题,近年来基于弯沉盆参数(Deflection Basin Parameters, DBP)进行路面各结构层性能状况的评价研究工作,得到了各国学者的普遍青睐。所谓DBP法是建立FWD路表DBP与路面结构性能评价指标(应力应变、各结构层模量)之间的定量关系,从而利用实测DBP评价路面各结构层的性能状况<sup>[7]</sup>。中国学者唐伯明等已针对DBP分析法进行了研究,但研究理论基础以拟静态多层连续弹性体系的反演分析模型为基础,没有充分考虑到FWD测试荷载的动力特性<sup>[8-9]</sup>。相比而言,国外学者采用动力有限元分析方法,构建了DBP与结构层厚度、模量以及路面响应(应力和应变)之间的对应数据库,并通过参数敏感性分析,建立了结构层模量参数反演分析回归方程,但研究过程缺乏对实际层间接触状态的考虑,进而导致模量参数反演结果可信度下降,同时研究对象的主体在柔性沥青路面结构体系范畴之内,能否将研究成果

直接应用于中国半刚性基层沥青路面,进行各结构层性能状况的评价分析值得怀疑<sup>[10-11]</sup>。基于此,笔者针对中国高等级公路典型半刚性基层沥青路面结构,充分考虑到FWD测试荷载的动力效应,基于动力有限元分析模型,采用动态弯沉盆参数法,构建了以层间完全连续为基础的模量参数反演分析模型,系统地分析了沥青面层与半刚性基层之间的非连续接触行为对模量参数反演结果的影响规律,据此提出了充分考虑层间接触状态的模量参数的系统校正分析方法,并进行了工程实例分析。

## 1 路面动力学分析基础理论

### 1.1 运动控制方程

对于动态结构,外力和位移都是时间的函数,根据弹性动力学的Hamilton变分原理,得到路面结构在动荷作用下每一时间点上的控制方程为<sup>[12]</sup>

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{Q}(t) \quad (1)$$

式中: $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{u}}(t)$ 分别为系统的结点加速度和速度向量; $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{Q}(t)$ 分别为系统的单元质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、结点荷载向量。

### 1.2 方程求解

动力平衡方程求解方法包括:振型叠加求解法和直接积分求解法。研究中采用Newmark- $\beta$ 直接积分法求解路面结构瞬时动态响应问题,其基本思想为:对结构体进行时间离散,并在时间离散点上满足方程(1),而在每个时间间隔采用Newton-Raphson迭代算法对位移、速度和加速度进行求解,直到满足收敛条件。求解计算过程中采用的基本方程式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{u}}_{i+1} = \dot{\mathbf{u}}_i + (1-\gamma)\Delta t\dot{\mathbf{u}}_i + \gamma\Delta t\ddot{\mathbf{u}}_{i+1} \\ \mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i + \Delta t\dot{\mathbf{u}}_i + (0.5-\beta)\Delta t^2\ddot{\mathbf{u}}_i + \beta\Delta t^2\ddot{\mathbf{u}}_{i+1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\gamma$ 、 $\beta$ 分别为按精度和稳定性要求确定的参数。

对于直接积分 Newmark- $\beta$ 算法的研究表明,当 $\gamma \geq 0.5$ , $\beta \geq 0.25(0.5 + \gamma)^2$ 时,该算法是无条件稳定的,计算中取 $\gamma = 0.505$ , $\beta = 0.2525$ ,同时为了得到较好的计算精度,应把时间步长 $\Delta t$ 限制在基本周期的 $1/50$ 以内<sup>[13]</sup>。

### 1.3 阻尼矩阵构成及系数求解

为了与直接积分 Newmark- $\beta$ 法求解思想相一致,阻尼矩阵采用 Rayleigh 假设,如式(3)。针对阻尼系数的求解问题,分析时首先对所求解的面结构模型进行模态分析,求出振动方向上 2 个主振型所对应的固有频率 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ ;其次从一般意义上了解该结构属于何种阻尼状态,确定阻尼比 $\xi$ ,通常取为 $0.05$ <sup>[12]</sup>;最后由式(4)求得结构计算所需的阻尼系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 。因为在路面动力学分析问题上一般不考虑路面结构体的扭转效应,因此通过模态分析所得到的第 1、第 2 振型就是路面体计算振动方向上的主振型,由此得到对应的固有频率 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 。

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2}, \quad \alpha = \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \xi \quad (4)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为与结构固有频率和阻尼比有关的阻尼系数,分别反映了粘性和结构阻尼分量。

## 2 动力有限元分析模型

### 2.1 材料参数

分析中将半刚性基层沥青路面简化为 3 层:沥青面层(AC)、半刚性基层(BC)和路基(SG)。每层材料均采用线弹性模型予以表征,各结构层材料动态模量参数的取值范围见表 1。

表 1 结构层材料参数取值

Tab. 1 Proposed parameters of structural layer materials

结构层	厚度/m	模量/MPa	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	阻尼比
AC	0.12~0.30	2 000~6 000	0.35	2 200	0.05
BC	0.25~0.45	3 000~13 000	0.25	2 100	
SG		100~400	0.35	1 800	

### 2.2 模型网格划分

采用平面 4 结点等参单元(PLANE42)进行路面结构计算模型网格划分时,兼顾计算精度以及能够通过节点结果直接获取 FWD 各传感器位置上的弯沉值,分析模型中径向方向上单元长度

取 5 cm,轴向方向采用非均匀映射网格划分。为了减小边界效应的影响(应力波在边界处的反射),在不考虑下卧较浅刚性层(由基岩、高地下水水位等因素造成)影响的前提下,通过逐步试算确定的最优模型尺寸的径向长度为 5 m,轴向路基深度为 6 m。边界约束条件为左边界施加对称约束,右边界分别施加水平向约束,底部施加固定约束,结构层之间假定为完全连续。路面结构模型及网格划分如图 1 所示,G1,G2,⋯,G9 为 9 点传感器。

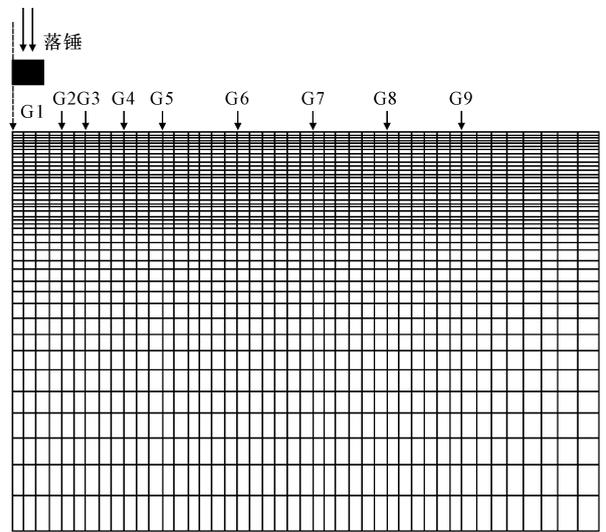


图 1 计算分析模型的网格划分

Fig. 1 Mesh of calculation model

### 2.3 FWD 荷载模型

将 FWD 冲击荷载简化为半波正弦均布荷载,如式(5)所示。荷载作用半径为 15 cm,具体布设方案见表 2。

$$p(t) = p_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{T}t\right) \quad (5)$$

式中: $p_{\max}$ 为荷载作用峰值,一般取 $0.7 \text{ MPa}$ ;  $T$ 为 FWD 冲击荷载作用周期,为 $0.03 \text{ s}$ 。

表 2 FWD 路表 9 点传感器布置方案

Tab. 2 Layout plan of nine point sensors of FWD

编号	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
弯沉	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$
距离/cm	0	20	30	60	90	120	150	180	210

## 3 基于层间完全连续的模量参数反演模型

### 3.1 动态 DBP 指标构建

DBP 指标的发展伴随着弯沉检测设备的更新

而发展,常用 DBP 指标概括为如下 7 类:①直接弯沉指标  $d_i (i=1\sim 9)$ ;②弯沉比指标  $D_{Ri} = d_i/d_1 (i=2\sim 9)$ ;③弯沉差指标  $D_{Di} = d_1 - d_i (i=2\sim 9)$ ;④曲率指标  $C_{1i} = d_i - d_{i+1} (i=1\sim 8)$ ;⑤形状指标  $F_i = (d_{i-1} - d_{i+1})/d_i (i=2\sim 8)$ ;⑥斜率指标  $S_i = (d_i - d_{i+2})/(r_{i+2} - r_i) (i=1\sim 7)$ ;⑦面积类指标  $A = (5d_1 - 2d_3 - 2d_5 - d_6)/2$ 。

### 3.2 DBP 指标敏感性分析

结合表 2 推荐的结构层材料参数取值范围,共计组装了 2 990 组半刚性基层沥青路面的结构形式,利用上述已建立的动力有限元分析模型,进行了路表 9 点理论动态弯沉计算,同时通过回归分析方法,探讨了面层模量( $E_{AC}$ )、基层模量( $E_{BC}$ )及土基模量( $E_{SG}$ )与上述 7 大类 DBP 指标之间的相关性。按相关系数由大到小的顺序排序,分析结果见表 3。由此可知,与  $E_{AC}$ 、 $E_{BC}$  及  $E_{SG}$  最为显著的 DBP 依次为弯沉差指标  $D_{D2}$ 、曲率  $C_{12}$  及直接弯沉指标  $d_9$ 。

表 3 DBP 指标与结构层模量的关联度

Tab. 3 Correlation of DBP index and structural layer modulus

排序	结构层模量					
	$E_{AC}$		$E_{BC}$		$E_{SG}$	
1	$D_{D2}$	0.956	$C_{12}$	0.711	$d_9$	0.985
2	$C_{11}$	0.956	$S_2$	0.709	$C_{18}$	0.944
3	$S_1$	0.930	$D_{D5}$	0.615	$S_7$	0.920
4	$A$	0.864	$A$	0.595	$F_8$	0.915
5	$D_{R2}$	0.680	$d_1$	0.590	$D_{R9}$	0.877
6	$F_2$	0.635	$F_3$	0.458	$A$	0.832
7	$d_1$	0.590	$D_{R5}$	0.356	$D_{D9}$	0.284

### 3.3 模量参数反演模型构建

以影响结构层模量较为显著的动态 DBP 指标为基础,通过逐次方差回归分析方法,建立 3 层半刚性基层沥青路面与  $E_{AC}$ 、 $E_{BC}$  及  $E_{SG}$  的反演模型,如式(6)~式(9)所示。其中,回归系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  与面层厚度( $h_{AC}$ )、基层厚度( $h_{BC}$ )之间的对应关系,如式(10)及表 4 所示。由此可知,分析模型具有较高的相关系数,且公式形式简单,可操作性强。

$$\ln(E_{AC}) = a \ln(D_{D2}) + b \ln(S_1) + c \ln(A) + d \quad (R^2 = 0.991) \quad (6)$$

$$\ln(E_{BC}) = a \ln(C_{12}) + b \ln(S_2) + c \ln(A) + d \quad (R^2 = 0.993) \quad (7)$$

$$E_{SG} = a + b(1/d_9) + cE_8 \quad (R^2 = 0.993) \quad (8)$$

$$S = k_1(h_{AC}h_{BC})^2 + k_2h_{AC} + k_3h_{BC} + k_4 \quad (9)$$

式中: $S$  分别为上述各反分析模型中的回归系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ ;  $R^2$  为判定系数; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$  为与厚度关联的系数。

表 4 回归系数与结构层厚度对应关系

Tab. 4 Relationship between regression coefficient and layer thickness

回归系数	与厚度关联的系数				$R^2$	
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$		
面层	$a$	136.57	-4.46	-7.41	-3.39	0.86
	$b$	-256.30	7.95	12.97	2.00	0.90
	$c$	133.18	-3.75	-5.89	0.42	0.93
	$d$	-1 074.80	30.78	50.69	17.44	0.90
基层	$a$	-310.22	22.53	18.74	-9.83	0.98
	$b$	450.54	-42.19	-14.65	8.55	0.99
	$c$	-149.17	18.49	-5.03	0.58	0.96
	$d$	1 558.54	-161.47	-25.24	31.88	0.99
土基	$a$	-9 855.39	64.10	-21.95	-101.63	0.98
	$b$	-13 6873.69	8 427.20	7814.02	159.13	0.99
	$c$	32 819.05	-689.18	-515.91	615.83	0.96

### 3.4 反演模型精度分析

结构层模量反演值( $E_F$ )与理论值( $E_L$ )之间的误差分析结果如下页图 2 所示。由此可知,面层、基层以及路基模量反演值与理论值之间的绝对相对误差均值分别为 2.26%、3.82% 和 2.36%;均方根误差分别为 2.83%、5.70% 和 3.51%。分析结果表明:当沥青面层与半刚性基层之间的接触状态为连续时,上述结构层模量参数的反演模型具有较高的精度保证,利用其可进行结构层模量参数的反演分析。

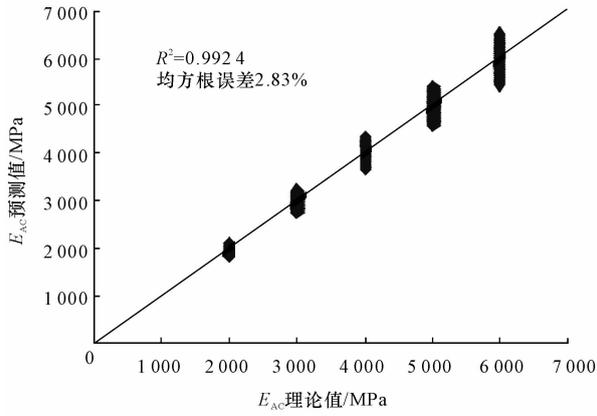
## 4 非连续接触行为对模量反演结果的影响分析

### 4.1 接触行为描述

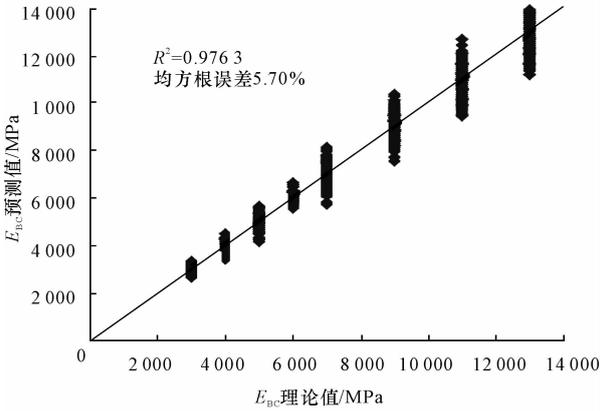
中国现行沥青路面设计规范假定沥青路面结构层之间的接触面完全连续,而工程实践表明:即使对于新建半刚性基层沥青路面而言,沥青面层与半刚性基层之间的实际接触状况既非完全连续,也非完全滑动,视施工和使用情况,处于两者之间<sup>[14]</sup>。分析时采用摩擦系数( $\mu$ )描述层间接触行为,即 2 个接触面在开始相互滑动之前,在界面上产生某一大小的临界剪应力  $\tau_{crit}$  为<sup>[15]</sup>

$$\tau_{crit} = \mu P \quad (10)$$

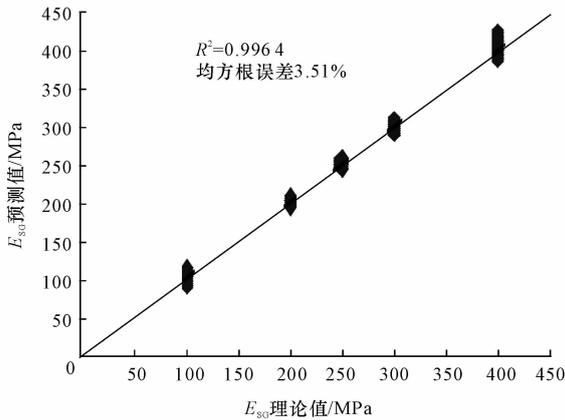
式中: $\mu$  为界面之间的摩擦系数,其值越小,界面粘结越差,相反界面粘结越好,取值一般界于 0~1 之间; $P$  为界面之间的法向压应力,大小由结构层层底所传递来的压应力决定。



(a) 面层模量



(b) 基层模量



(c) 路基模量

图2 结构层模量预测值与理论值之间误差分析

Fig. 2 Error analysis between predicative value and theoretical value of structural layer modulus

## 4.2 分析方案

首先,从理论上计算不同层间接触状态时路表动态弯沉盆的分布,构造用于各结构层模量参数反演分析的DBP指标;其次,利用已建立的基于层间完全连续各结构层模量反演模型,反演各结构层的模量值;最后,通过对比模量反演值与理论值的比值,探求面层与基层之间的非连续接触行为对模量参数反演结果的影

响规律。分析时所选取的4种典型路面结构(A、B、C、D)的面层、基层厚度保持不变,分别为16 cm和40 cm。各结构层材料模量参数的取值,见表5。

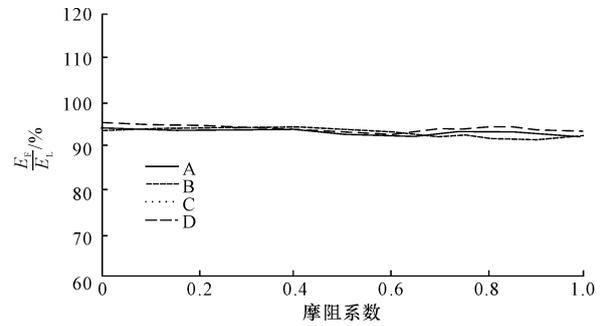
表5 典型路面结构材料参数取值

Tab. 5 Parameters of typical pavement structural materials

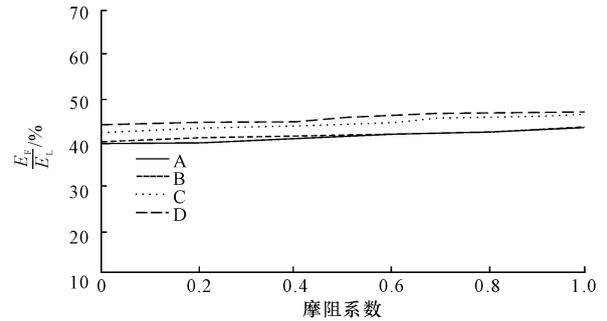
路面结构	$E_{AC}/\text{MPa}$	$E_{BC}/\text{MPa}$	$E_{SG}/\text{MPa}$
A	2 000	3 000	100
B	3 000	5 000	200
C	5 000	7 000	300
D	6 000	9 000	400

## 4.3 计算结果与分析

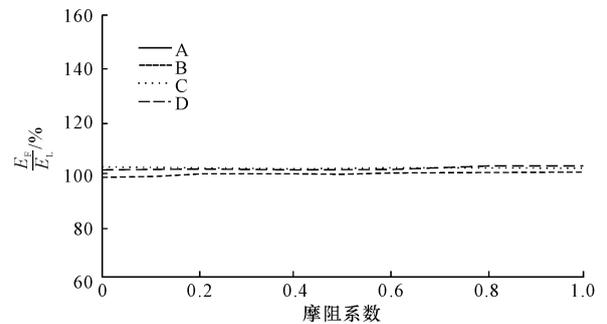
基于上述分析方案,不同层间接触条件下模量参数反演值 $E_F$ 与理论值 $E_L$ 的对比分析结果,如图3所示。



(a) 面层模量变化



(b) 基层模量变化



(c) 路基模量变化

图3 层间接触状态对结构层模量反演结果的影响

Fig. 3 Influences of interlayer contact states on modulus back calculation results of structural layer

由图 3 可知:面层、土基模量反演值与理论值的比分别为 92%~96% 和 98%~102%,其中面层模量反演值略小于理论值,土基模量反演值与理论值基本吻合;表明忽略层间实际接触状态,直接利用上述以层间完全连续为基础的模量参数反演模型,对面层和土基模量进行反演分析合理可行。层间接触状态对基层模量的反演结果影响显著,将导致反演值与理论值的比处于 35%~45%之间,反演结果显著偏低,进而不能充分体现基层结构的实际性能状况;分析其本质原因是利用低估基层模量来体现因层间存在不连续接触行为而导致路面结构整体承载能力下降的特征。

## 5 基层模量反演结果的校正分析

### 5.1 校正分析流程

由于理论分析模型(假定层间完全连续)与实际路面结构层间接触状态的差异,显然这两组弯沉盆一般不相等,进而导致基层模量参数反演值显著偏低,研究中通过引入层间摩阻系数,对其进行了校正分析。具体实施方案如下。

(1)基于实测 FWD 路表动态弯沉盆及结构层厚度参数,利用上述模量反演分析模型,进行各结构层模量参数的反演分析,同时采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)评价实测弯沉盆与理论弯沉盆的拟合度,见式(11),并将评价结果定义为  $RMSE_1$ 。

(2)考虑到实际路面结构层间客观存在的非连续接触行为,引入层间摩阻系数,假定由(1)反演的土基和面层模量保持不变,采用适当迭代步长(分析中摩阻系数增量步长  $\Delta u$  取为 0.1,且取值范围在 0~1 之间;以由(1)反演的基层模量为初始值  $E_{BC}$ ,增量步长  $\Delta E_{BC}$  取为 0.02 倍的  $E_{BC}$ ,取值范围在  $E_{BC} \sim 3E_{BC}$  之间,且最大值不超过 14 000 MPa),不断修正基层模量及层间摩阻系数,直至理论弯沉盆与实测弯沉盆的拟和情况达到 RMSE 最小为止,并记为  $RMSE_2$  等于  $\min(RMSE)$ 。

(3)综合比较  $RMSE_1$  和  $RMSE_2$  的大小,当  $RMSE_1$  小于  $RMSE_2$  时,说明层间接触状态接近完全连续,此时直接将按(1)反演的各结构层模量参数反演结果直接输出;当  $RMSE_2$  小于等于  $RMSE_1$  时,说明层间接触状态非完全连续,将按(1)反演的面层以及土基模量,以及按(2)反演的基层模量以及

层间摩阻系数进行输出,并作为最终反演结果。

$$I_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n \left( \frac{l_i^0 - l_i^1}{l_i^1} \right)^2} \times 100\% \quad (11)$$

式中: $I_{RMSE}$  为 RMSE 的计算公式表示; $l_i^0$  为路表实测弯沉; $l_i^1$  为路表理论弯沉。

### 5.2 工程实例分析

以沪宁(上海—宁波)高速公路(上海段)拓宽工程为依托,利用 PRI2100 型 FWD 测试设备对既有半刚性基层沥青路面进行了路表弯沉测试,以其中的 2 个监测点为例,结构层厚度及 FWD 测试数据见表 6。2 种不同接触状态下,模量参数反演结果见表 7。

表 6 FWD 检测点的弯沉盆数据

Tab. 6 Deflection basin data of FWD surveying points

测点	层厚/cm		路表实测弯沉值/ $\mu\text{m}$								
	AC	BC	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$
1	23	43	142	113	106	92	75	68	59	46	39
2	16	43	109	82	73	61	55	44	36	29	23

表 7 FWD 检测点的弯沉盆数据

Tab. 7 Deflection basin data of FWD surveying points

测点		$E_{AC}/\text{MPa}$	$E_{BC}/\text{MPa}$	$E_{SG}/\text{MPa}$	摩阻系数	$I_{RMSE}/\%$
1	连续	4 198	2 466	155	连续	13.3
	非连续	4 198	8 014	155	0.4	10.9
2	连续	5 211	3 341	179	连续	6.2
	非连续	5 211	7 735	179	0.2	4.2

由此可知:直接利用以层间完全连续为基础的结构层模量参数反演模型,对测点 1、2 对应的路面结构进行模量参数反演分析,将导致基层模量反演值偏低,分别为 2 466 MPa 和 3 341 MPa,而这一结果甚至低于与其对应的沥青面层模量反演值 4 198 MPa 和 5 211 MPa,这明显不符合常理。考虑层间实际接触行为的模量参数反分析校正方法,使得实测弯沉盆与理论计算弯沉盆之间的拟合度有所改善,测点 1、2 的弯沉盆拟合度分别提高了 18.05% 和 32.26%,此时基层模量的反演校正有了大幅度提高,分别增大至 8 014 MPa 和 7 735 MPa。反演结果较为真实地反映了基层结构的实际性能状态,同时客观地反映了实际路面结构层间存在的非连续接触行为。

## 6 结 语

(1)7 大类路表动态弯沉盆参数指标与半刚性基层沥青路面各结构层模量之间具有良好的相关

性,基于路表动态弯沉盆参数指标,建立的的结构层模量反演分析模型,具有较高的相关系数,公式形式简单,可操作性强。

(2)忽略沥青面层与半刚性基层之间的非连续接触行为对面层和土基模量的反演结果影响不大,但使基层模量反演结果显著偏低,反演值与理论值的比处于35%~45%之间,模量参数反演分析中应充分考虑层间的实际接触行为。

(3)工程实例分析表明,本文提出的基层模量参数的系统校正方法,合理可靠,能够客观地反映出半刚性基层沥青路面基层结构的实际性能状态及层间接触条件。

### 参考文献:

### References:

- [1] AASHTO, Guide for design of pavement structures [S].
- [2] Goktepe A B, Agra E, Lav A H. Advances in back-calculating the mechanical properties of flexible pavements[J]. Advances in Engineering Software, 2006, 37(7):421-431.
- [3] Hakim B A, Cheung L W, Armitage R J. Use of FWD data for prediction of bonding between pavement layers [J]. International Journal of Pavement Engineering, 1999, 1(1), 49-59.
- [4] Stefan A R, Metcalf J B. The errors in pavement layer moduli backcalculation due to Improper modeling of layer Interface condition[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1639(2):36-42.
- [5] Uddin W, Pan Z. Finite-element dynamic analysis of distressed asphalt pavements [C]//The International Society for Asphalt Pavements. 8th International Conference on Asphalt Pavements. Seattle; Federal Highway Administration, 1997:725-739.
- [6] 魏翠玲,王复明. FWD无损检测数值的动态分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4):495-497.  
WEI Cui-ling, WANG Fu-ming. Dynamic analysis of FWD nondestructive test data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4):495-497. (in Chinese).
- [7] Hee M P. Use of FWD multi-load level data for pavement strength estimation [D]. Raleigh; North Carolina State of University, 2001.
- [8] 丰晓,唐伯明,李锦华. FWD应用于沥青路面结构承载能力的非破损评价[J]. 同济大学学报, 1996, 24(5):520-524.
- FENG Xiao, TANG Bo-ming, LI Jin-hua. Nondestructive evaluation with FWD on structural bearing capacity of asphalt pavements[J]. Journal of Tongji University, 1996, 24(5):520-524. (in Chinese).
- [9] 谈至明,吁新华. 沥青面层的截面弯曲刚度当量模量计算[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6):37-42.  
TAN Zhi-ming, YU Xin-hua. Calculation of sectional flexural stiffness equivalent modulus of asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6):37-42. (in Chinese)
- [10] Lee Y C, Kim Y R, Ranjithan S R. Dynamic analysis-based approach to determine flexible pavement layer moduli using deflection basin parameters[J]. Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1639(2):36-42.
- [11] Bing X U. Assessing pavement layer condition using FWD deflection data [D]. Raleigh; North Carolina State of University, 2000.
- [12] Ray W C, Joseph P. Dynamics of structure[M]. New-york:Computers and Structures Inc, 1995.
- [13] 邱欣,凌建明,方鹤,等. 材料阻尼对沥青路面动态弯沉影响的机理分析[J]. 力学与实践, 2008, 30(6):51-55.  
QIU Xin, LING Jian-ming, FANG He, et al. Mechanism analysis of damping effect on dynamic deflection of asphalt pavement[J]. Mechanics in Engineering, 2008, 30(6):51-55. (in Chinese).
- [14] Romanosch S A. Characterization of pavement layer interfaces[D]. Baton Rouge; Louisiana State University, 1999.
- [15] 黄宝涛,廖公云,张静芳. 半刚性基层沥青路面层间接触临界状态值的计算方法[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2007, 37(4):666-670.  
HUANG Bao-tao, LIAO Gong-yun, ZHANG Jing-fang. Analytical method of interlayer contact fettle in semi-rigid-base bituminous pavement[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(4):666-670. (in Chinese).