科学通报 2020 年 第 65 卷 第 30 期: 3287 ~ 3297
香山科学会议专栏 论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
第S54次学术讨论会·中国长寿命路面关键科学问题及技术前沿

沥青路面结构层模量反演最佳特征点的确定

胡玥[1], 臧国帅[2], 孙立军[1*], 刘黎萍[1], 程怀磊[1]

1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;
2. 江苏中路交通科学技术有限公司, 南京 210019
* 联系人, E-mail: ljsun@tongji.edu.cn

2020-02-02 收稿, 2020-04-27 修回, 2020-04-29 接受, 2020-04-30 网络版发表
国家重点研发计划(2018YFB1600100)资助

摘要 基于落锤式弯沉仪(falling weight deflectometer, FWD)检测数据的路面结构层反演模量逐渐成为评价路面结构承载力的重要指标. 在结构层模量反演方法中, 弯沉盆规律法能够得到反演唯一解, 工程应用性强. 但现阶段弯沉盆规律法中, 用于反演路面基层模量、面层模量的特征点位置的确定均基于理论分析, 未得到实测弯沉盆数据的验证. 因此, 为进一步确定特征点的最佳位置, 我们对不同路面结构不同层位的弯沉盆实测数据进行了研究. 首先, 利用交通运输部RIOHTRACK足尺环道试验的弯沉数据, 分析了不同特征点位置对基层反演模量的影响; 其次, 以基于不同层位弯沉数据反演出的基层模量是否具有一致性为原则, 确定了特征点的最佳位置; 最后, 利用独立弯沉数据对其准确性进行了验证. 结果表明, 对于实测弯沉盆数据, 特征点选取位置对逐层反演基层模量一致性具有显著影响; 对于2层结构体系, 特征点位置选取为距离荷载中心点30 cm处, 对于3层结构体系, 特征点位置选取为荷载中心点和距离荷载中心点60 cm处时, 逐层反演的基层模量一致性最好.

关键词 落锤式弯沉仪, 反演, 弯沉盆规律法, 基层反演模量一致性, 特征点位置

路面结构承载能力的无损检测为在役路面结构状况评估及剩余服役寿命预估提供了重要的数据支持. 现有路面无损检测方法中, 基于落锤式弯沉仪(falling weight deflectometer, FWD)数据的方法得到越来越多的关注; 其中, 所使用的评价指标包括FWD弯沉值及基于FWD弯沉值反演得到的路面结构层模量[1~3]. 弯沉值指标仅反映路面各结构层的综合承载能力, 相比之下, 模量指标则能够精确地表征各结构层自身的结构状况, 在应用上更为灵活、准确. 因此, 为更精确地获得各结构层的模量, 需要高效、准确的模量反演方法提供支持.

目前, 国内外许多研究者对基于FWD弯沉数据的模量反演方法进行了研究, 提出了大量的反演算法, 如迭代法、数据库搜索法、回归公式法、数学规划法及各类优化算法等[4~11]. 以上反演方法的反演原则为找到一组结构层模量值, 使得实测的弯沉盆与理论弯沉盆匹配度最高, 可统一概括为弯沉盆匹配法[12,13]. 弯沉盆匹配法易存在的问题是反演解不唯一和受初始值影响大, 这极大地限制了反演结果的工程应用.

为解决反演方法中反演解不唯一的问题, 孙立军等人[14]提出了“惰性弯沉点”的概念, 并证明该点仅与土基模量和路面厚度相关, 为解决路面结构层模量反演的唯一性问题提供了新的思路. 基于此, 胡圣等人[15]利用“惰性弯沉点”反演了水泥混凝土路面的结构层模量. 张小宁和孙立军[16,17]验证了沥青路面存在“惰性弯沉点”, 在利用惰性点反演出路基模量后, 提出了沥青

引用格式: 胡玥, 臧国帅, 孙立军, 等. 沥青路面结构层模量反演最佳特征点的确定. 科学通报, 2020, 65: 3287–3297
Hu Y, Zang G S, Sun L J, et al. Determination of optimal identity points for backcalculating the structural layer moduli of asphalt pavement (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3287–3297, doi: 10.1360/TB-2020-0094

© 2020《中国科学》杂志社

路面三层体系的反演新方法. 该方法被定义为弯沉盆规律法, 是指考虑弯沉盆本身受结构参数影响的规律, 寻找一些规律性强且具有特殊意义的点来反演路面模量, 可分解为利用惰性点来反演土基模量及利用特征点来反演结构层模量. 弯沉盆规律法具有反演速度快、精度高且有唯一解的特点. 在弯沉盆规律法的基础上, 臧国帅等人[18]提出了一种"虚拟惰性点"反演路基模量的方法, 即基于有限点检测弯沉值预测完整弯沉盆信息后, 找到该弯沉盆的惰性弯沉点来反演路基模量, 该方法显著提高了路基模量的反演精度.

对于沥青路面三层结构体系, 除需惰性点反演土基模量外, 还需选取2个特征点位置, 以这2个位置处的弯沉值建立2个方程来确定面层和基层模量. 张小宁和孙立军[17]认为, 应该选取荷载中心点和其附近的位置. 朱洁和孙立军[19]通过分析发现, 当特征点位置选取为荷载中心点和距离荷载中心点20 cm时, 结构层反演模量的误差最小. 但是, 这些结论均基于理论分析而未进行实测弯沉盆验证分析. 本文依托交通运输部RIOH-TRACK足尺路面试验环道的逐层弯沉检测数据, 确定了弯沉盆规律法中用于反演路面结构中面层和基层模量的特征点的最佳位置, 降低了该方法反演结果的不稳定性, 提高了反演精度.

1 弯沉盆规律法反演结构层模量

1.1 基于惰性点反演土基模量

利用FWD检测装置, 可以得到弯沉盆数据. FWD加荷装置和弯沉盆示意图如图1(a)所示. 在相同荷载作用下, 对于同一路面厚度(面层厚度和基层厚度之和)和路基模量的路面结构, 面层模量和基层模量越小, 弯沉盆越陡; 面层模量和基层模量越大, 弯沉盆越平坦, 因此这两个弯沉盆必将相交于一点, 我们将这点定义为惰性弯沉点.

惰性弯沉点只与路面厚度(记为H)和路基模量(记为E_0)有关, 具有两个关键参数: 惰性点至荷载中心点距离(记为R_c)和惰性点处弯沉(记为D_c), 则

$$R_c = f(H, E_0), D_c = g(H, E_0). \tag{1}$$

路面厚度已知时, 式(1)可简化为

$$R_c = f(E_0), D_c = g(E_0), \tag{2}$$

即R_c、D_c是与E_0一一对应的函数, 因此存在着这样的隐式函数关系: R_c=F(D_c). 弯沉盆曲线上满足这个函数关系的只有惰性弯沉点, 图1(b)对此作出了一个直观的解释. 图1(b)中曲线②是R_c=F(D_c)的轨迹, 即惰性点参数方程. 当E_0增大时, R_c和D_c均减小, 轨迹指向荷载中心点, 而当测得弯沉盆曲线时, 由于两条曲线成一定角度, 因此只有唯一一个交点. 该点对应的土基模量即为该检测弯沉盆所对应的土基模量反演值, 具有唯一解.

对于实际路面, 路面厚度H往往可以根据设计资料或者雷达探测仪等方法获得, 因此可以利用惰性点参数方程唯一确定路基模量. 由文献[18]可知, 对弯沉进行插值和拟合弯沉盆完整信息后, 采用式(3)和(4)对惰性点的位置和弯沉分别进行拟合, 反演出的路基模量误差均小于3%, 模量反演精度很高. 具体的回归参数值见表1. 可以看出, 惰性点参数的相关系数R^2均接近1, 说明拟合效果很好.

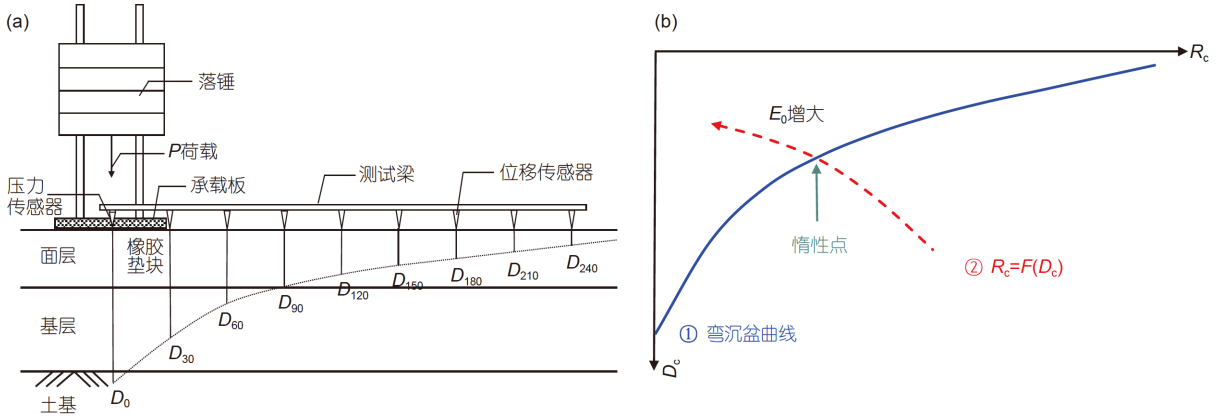


图 1 (网络版彩色)弯沉盆和惰性点示意图. (a) FWD加荷装置示意图; (b) 惰性点唯一性示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the deflection basin and inertial point. (a) Schematic diagram of FWD loading device; (b) schematic diagram of unique inertial point

表 1　惰性点参数回归结果

Table 1　Inertial point parameter regression results

R_c模型回归参数	取值	D_c模型回归参数	取值
$a_1/10^2$	2.557	$b_1/10^{-2}$	9.944
$a_2/10^1$	1.907	$b_2/10^1$	1.524
$a_3/10^1$	–19.29	$b_3/10^{-2}$	–7.21
$a_4/10^{-2}$	–3.198	$b_4/10^1$	13.53
$a_5/10^0$	47.27	$b_5/10^{-2}$	1.785
$a_5/10^0$	–4.695	$b_6/10^0$	–5.313
$a_7/10^{-6}$	–202.4	$b_7/10^2$	–4.517
$a_8/10^{-1}$	–36.67	$b_8/10^{-3}$	–1.517
$a_9/10^{-2}$	30.69	$b_9/10^{-1}$	4.804
$a_{10}/10^{-3}$	9.718	$b_{10}/10^0$	–17.39
相关系数R^2	0.9995	相关系数R^2	0.9997

$$\begin{aligned}R_c = {} & a_1 + a_2 H + a_3 \ln(E_0) + a_4 H^2 + a_5 (\ln(E_0))^2 \\ & + a_6 H \ln(E_0) + a_7 H^3 + a_8 (\ln(E_0))^3 + a_9 H (\ln(E_0))^2 \\ & + a_{10} H^2 \ln(E_0),\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}D_c = {} & b_1 + b_2 H^{-1} + b_3 \ln(E_0) + b_4 H^{-2} + b_5 (\ln(E_0))^2 \\ & + b_6 H^{-1} \ln(E_0) + b_7 H^{-3} + b_8 (\ln(E_0))^3 \\ & + b_9 H^{-1} (\ln(E_0))^2 + b_{10} H^{-2} \ln(E_0).\end{aligned} \tag{4}$$

1.2　基于特征点反演其余结构层模量

在利用惰性点反演路基模量之后，进一步利用特征点反演面层、基层等其余结构层的模量．已有研究[17,19]表明，面层和基层模量仅对荷载中心点附近的弯沉有显著影响，对距离荷载中心点较远位置的弯沉影响并不显著. 因此，可选取荷载中心点附近的两个点的弯沉匹配为目标，列方程求解面层和基层模量. 这两个点即定义为路面的特征点，分别记为I_{p1}和I_{p2}，其中I_{p1}更接近荷载中心点.

对于沥青路面3层体系来说，在利用惰性点反演路基模量之后，面层模量和基层模量可用下述步骤进行反演分析.

步骤1　根据沥青层模量试算范围E_{a1}~E_{a2}和基层模量试算范围E_{b1}~E_{b2}，分别确定面层初始试算值E_a=(E_{a1}+E_{a2})/2和基层初始试算值E_b=(E_{b1}+E_{b2})/2.

步骤2　保持E_a不变，通过调整E_b使得I_{p1}处的理论弯沉值($w_{I_{p1}}^{t}$)和实测弯沉值($w_{I_{p1}}^{m}$)差值的绝对值小于指定精度ε_1：若$\left|w_{I_{p1}}^{t} - w_{I_{p1}}^{m}\right| < \varepsilon_1$，则运行步骤3；否则，当$w_{I_{p1}}^{t} < w_{I_{p1}}^{m}$，则需减小基层模量，$E_{b2} = E_b$，$E_b = (E_{b1} + E_{b2})/2$；反之，则需增大基层模量，$E_{b1} = E_b$，$E_b = (E_{b1} + E_{b2})/2$，重复此步骤直到满足精度要求.

步骤3　验证I_{p2}的理论弯沉值($w_{I_{p2}}^{t}$)和实测弯沉值($w_{I_{p2}}^{m}$)差值的绝对值是否小于指定精度ε_2：若$\left|w_{I_{p2}}^{t} - w_{I_{p2}}^{m}\right| < \varepsilon_2$，则运行步骤4；否则，当$w_{I_{p2}}^{t} < w_{I_{p2}}^{m}$，则需增大面层模量，$E_{a1} = E_a$，$E_a = (E_{a1} + E_{a2})/2$；反之，则需降低面层模量，$E_{a2} = E_a$，$E_a = (E_{a1} + E_{a2})/2$，转至步骤2.

步骤4　停止计算，输出面层模量E_a和基层模量E_b.

上述反演过程中，对于步骤2，通过调整基层模量试算值使特征点I_{p1}处的实测弯沉值与理论计算值趋于一致；每调整一次，基层模量试算的范围会减小一半，由于路面弯沉值与结构层模量呈现单调正相关关系，因此该计算过程可以很快收敛. 同样地，对于步骤3，通过不断调整面层模量，使得模量反演值不断在实测值附近波动，试算范围不断减小，最终收敛于某一唯一值. 因此，以上过程是收敛的，且解是唯一的.

基于以上分析，沥青路面3层结构体系模量的基本流程主要分为两步：首先，利用惰性点反演土基模量；其次，利用两个特征点反演面层及基层模量. 反演流程汇总如图2所示. 类似地，对于2层结构体系，只需一个特征点处的弯沉值即可反演得到基层模量.

2　特征点最佳位置分析

2.1　特征点最佳位置确定方法

已有研究表明，特征点位置的选择对基层模量反演结果有较大影响[20]. 当特征点远离荷载中心点时，基层的反演模量显著增大. 这种增大趋势是由弯沉盆在距离荷载中心点较远位置处的弯沉偏小引起的，而弯沉偏小可能是由于路面结构在实际使用过程中基层存在损伤，传荷能力下降.

基于此，本文选取特征点位置的原则为：利用特征点法反演同一路面结构同一测点处不同层位弯沉盆信息得出的基层模量应该具有良好的一致性，以降低反演结果的不确定性. 结合收集到的不同测点的逐层弯

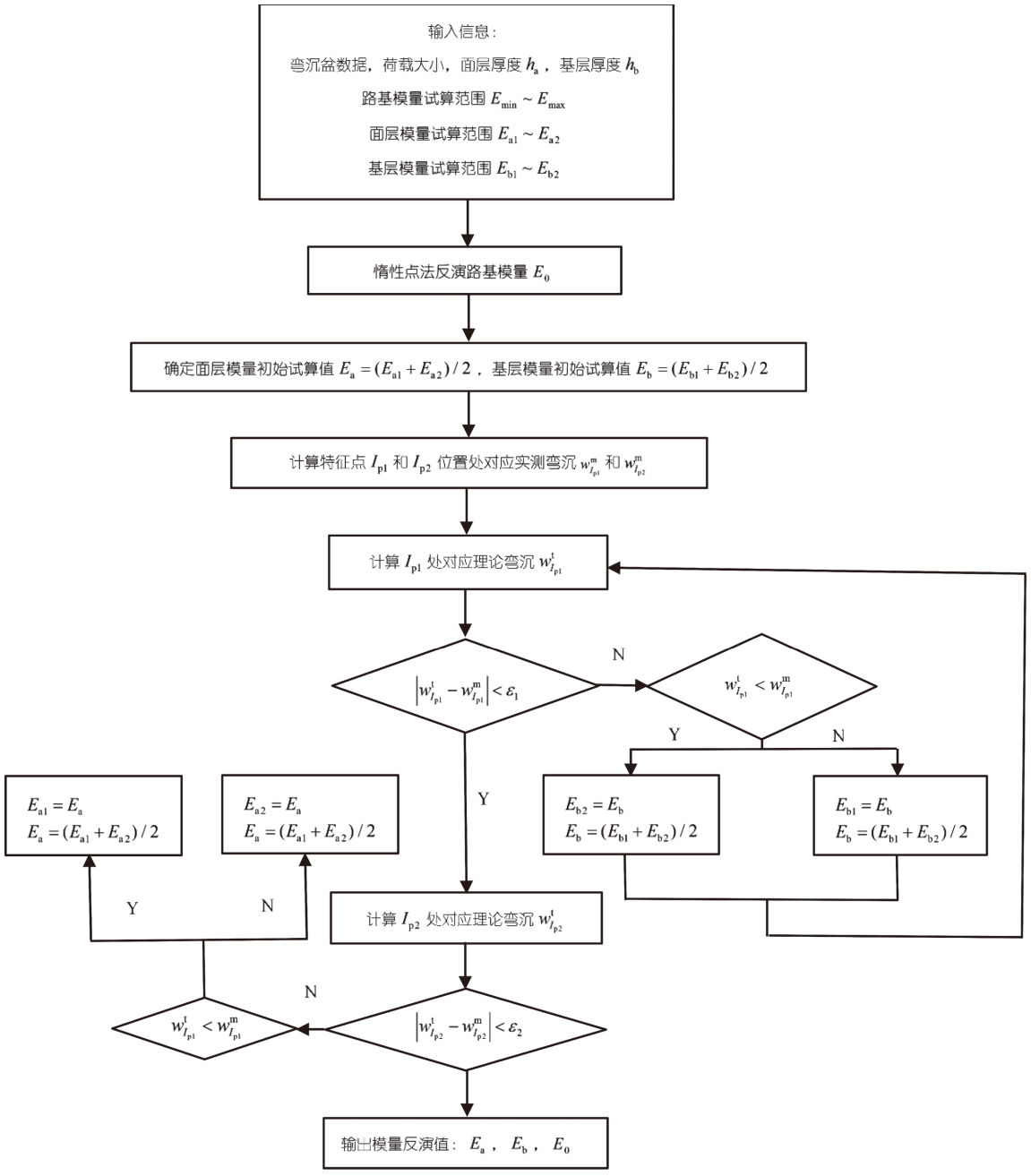


图 2 沥青路面3层结构体系反演流程图
Figure 2 Flowchart of the basin law algorithm for the 3-layer asphalt pavement

沉盆检测数据，基层反演模量的一致性可以用均方根变异系数(CV_{rms})来表示，计算公式如下：

$$CV_{rms}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}CV_i^2/n}, \tag{5}$$

式中，CV_i为第i个测点基层反演模量的变异系数，n为测点总数. 具体计算步骤为：对于某一种路面结构的逐层检测弯沉盆数据，首先，对于基层顶面弯沉盆数据，利用基层顶面特征点反演基层模量；对于面层顶面弯沉盆数据，利用面层顶面特征点来反演面层模量和基层模量. 然后，计算得到该路面结构的基层反演模量的变异性. 最后，对所有路面结构的基层反演模量的变异性

进行计算, 得到均方根变异性.

2.2 特征点最佳位置的确定

利用交通运输部RIOHTRACK足尺环道路面试验平台的9个路面结构的逐层检测弯沉盆数据进行特征点最佳位置的确定. RIOHTRACK位于北京市通州区, 是我国第一条足尺路面环道试验路, 全长2038.77 m, 路面结构厚度信息和逐层检测弯沉盆数据如表2所示. 其中, CBG为水泥稳定碎石, LCC为贫混凝土, w_1, w_2, …, w_9分别为距离荷载中心点0、30、60、90、120、

表 2 路面结构信息和逐层检测弯沉盆数据

Table 2 Structure information of the asphalt pavements and layer-by-layer measured deflection basin data

路面结构	层位编号	材料	路面厚度(cm)	弯沉(0.01 mm)								
				w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9
STR2	A1	AC13	4	7.5	6.2	4.9	4.3	3.8	2.9	2.5	2.2	1.9
	A2	AC20	8	8.4	6.8	5.3	4.6	4.0	3.0	2.6	2.2	1.9
	B1	CBG	18.9	6.7	5.9	4.8	4.2	3.7	2.9	2.5	2.2	1.9
	B2	CBG	19.4	19.8	16.0	11.2	7.9	6.5	5.0	3.9	3.2	3.0
STR4	A1	AC13	4	6.3	4.9	3.9	3.6	3.3	2.6	2.3	2.1	1.8
	A2	AC20	8	7.7	5.5	4.4	4.0	3.6	2.8	2.5	2.2	1.9
	B1	LCC	24	5.9	5.5	4.4	4.0	3.6	2.8	2.5	2.2	1.9
	B2	CBG	17.8	22.0	15.7	10.9	8.0	6.1	4.5	3.7	3.1	2.6
STR6	A1	AC13	4	7.4	5.7	4.5	4.0	3.6	2.8	2.5	2.1	1.9
	A2	AC25	12	9.3	6.3	5.2	4.6	4.0	3.1	2.7	2.3	2.0
	B1	CBG	17.9	7.4	6.7	5.3	4.6	4.0	3.1	2.7	2.2	1.9
	B2	CBG	15.5	20.3	15.9	11.6	8.5	6.4	4.5	3.7	3.0	2.6
STR7	A1	AC13	4	6.7	5.2	4.2	3.7	3.4	2.7	2.4	2.1	1.8
	A2	AC20	6	7.7	5.7	4.6	4.1	3.7	2.8	2.5	2.1	1.8
	A3	AC25	8	8.7	6.3	5.2	4.6	4.1	3.1	2.7	2.2	1.9
	B1	CBG	17.4	7.0	6.3	5.2	4.5	4.0	3.1	2.7	2.3	2.0
	B2	CBG	16.9	18.7	15.3	10.9	8.0	6.1	4.3	3.5	2.8	2.5
STR8	A1	AC13	4	7.1	5.6	4.3	3.9	3.5	2.7	2.4	2.1	1.9
	A2	AC20	6	7.2	5.7	4.4	3.7	3.2	2.5	2.2	1.9	1.7
	A3	AC25	8	10.1	7.4	5.9	5.0	4.3	3.2	2.8	2.4	2.0
	B1	CBG	19.2	9.4	7.3	5.7	4.8	4.0	3.0	2.6	2.2	1.9
	B2	CBG	16.5	21.9	15.7	10.5	7.5	5.7	4.0	3.4	2.9	2.5
STR9	A1	AC13	4	7.2	5.8	4.5	3.9	3.4	2.6	2.4	2.1	1.9
	A2	AC20	6	9.2	7.0	5.3	4.5	3.9	3.0	2.5	2.1	1.9
	A3	AC25	8	10.2	7.2	5.7	4.8	4.2	3.1	2.7	2.3	2.0
	B1	CBG	17.9	8.7	7.1	5.5	4.6	4.0	3.0	2.6	2.3	2.0
	B2	CBG	17.3	17.4	13.5	9.5	7.1	5.5	3.9	3.3	2.8	2.4
STR11	A1	AC13	4	6.6	5.1	4.0	3.5	3.2	2.5	2.3	2.0	1.8
	A2	AC20	6	7.6	5.3	4.1	3.6	3.3	2.4	2.2	1.9	1.7
	A3	AC25	8	9.1	6.5	5.0	4.3	3.8	2.9	2.5	2.2	1.9
	A4	AC25	10	11.4	7.3	5.9	4.9	4.2	3.2	2.8	2.4	2.1
	B1	CBG	19.6	7.3	6.6	5.1	4.4	3.9	3.0	2.6	2.2	2.0
	B2	CBG	18.7	20.2	16.2	11.0	8.3	6.2	4.7	3.9	3.5	2.9
STR13	A1	AC13	4	6.6	5.1	4.0	3.5	3.2	2.5	2.3	2.0	1.8
	A2	AC20	8	7.5	5.6	4.4	3.9	3.4	2.6	2.3	2.0	1.8
	A3	AC25	12	9.6	7.2	5.7	4.8	4.1	3.1	2.7	2.3	2.0
	B1	CBG	19.5	7.3	6.5	5.1	4.4	3.9	3.0	2.7	2.3	2.1
	B2	CBG	18.1	20.0	15.9	11.3	8.4	6.4	4.7	3.9	3.3	2.8
STR14	A1	AC13	4	7.6	5.7	4.6	4.0	3.5	2.7	2.4	2.1	1.9
	A2	AC20	8	9.7	6.7	5.1	4.4	3.8	2.9	2.5	2.2	1.9
	A3	AC25	12	9.7	7.5	5.7	4.8	4.1	3.1	2.6	2.3	2.0
	B1	CBG	18.6	10.7	8.6	6.2	5.1	4.3	3.3	2.8	2.5	2.2
	B2	CBG	17.3	16.2	13.3	9.6	7.3	5.8	4.3	3.6	3.1	2.7

150、180、210、240 cm处的弯沉值. 面层层位编号为A, 基层层位编号为B, 随着数字逐渐增大, 层位逐渐下降, 即A1代表沥青面层第一层, B1代表基层第一层.

由表2可知, 9个弯沉传感器的具体分布位置为荷载中心点和距离荷载中心点30、60、90、120、150、180、210、240 cm处. 由于面层模量和基层模量对荷载中心点附近的弯沉值影响较大, 因此对于基层顶面弯沉盆, 特征点位置选取为弯沉传感器所在位置, 具体为0、30、60、90 cm; 而对于面层顶面弯沉盆, 除选取这些特征点外, 还考虑了朱洁[19]基于理论分析的荷载中心点和20 cm的位置组合. 另外, 为了反映变化规律, 选取了45和75 cm两处位置, 该位置上的弯沉利用三次样条插值方法对弯沉盆进行内插得到. 特征点选取位置如表3所示, 其中, 对于基层顶面弯沉盆数据, 即2层结构, 特征点选取位置有4种; 对于面层顶面弯沉盆数据, 即3层结构, 特征点选取位置有7种.

各特征点位置下的基层反演模量变异性结果如图3所示. 可以看出, 当基层顶面的特征点位置不变时, 随着面层顶面特征点位置远离荷载中心点, 基层反演模量的变异性均呈现先减小后增大的趋势, 且不同面层特征点位置处的基层反演模量的变异性相差较大. 当基层顶面特征点为荷载中心点时, 基层反演模量变异性的极小值出现在面层特征点位置(0 cm, 45 cm), 极小值为17%; 在面层特征点位置为(0 cm, 60 cm)时, 基层反演模量的变异性为18%, 与17%极为接近. 当基层顶面特征点分别为距离荷载中心点30、60和90 cm时, 基层反演模量变异性极小值出现在面层特征点位置(0 cm, 60 cm)处, 分别为12%、21%和38%. 因此, 可以认为当基层顶面特征点位置为距离荷载中心点30 cm, 面层顶面特征点分别为荷载中心点和距离荷载中心点60 cm处时, 基层反演模量的均方根变异性达到全局极小值, 为12%.

表 3 特征点位置选取

Table 3 Selection of identity points

结构体系	特征点个数	特征点可能位置(cm)
2层结构	1	0、30、60、90
3层结构	2	(0, 20)、(0, 30)、(0, 45)、(0, 60)、(0, 75)、(30, 60)、(30, 90)

利用上述确认的特征点位置, 对表2中各个层位弯沉盆数据进行模量反演, 基层反演结果如图4所示. 图4中层位编号A1、A2、A3、A4、B1及B2对应的基层模量分别指根据相应层位顶部测得弯沉盆反演得到的基层模量值.

从图4可以看出, 除了str9和str14的基于下基层顶面弯沉盆数据反演的基层模量显著偏大, 表现异常外, 对于某一路面结构, 当采用特征点法反演时, 基于不同层位弯沉盆数据反演得到的基层模量具有很好的吻合

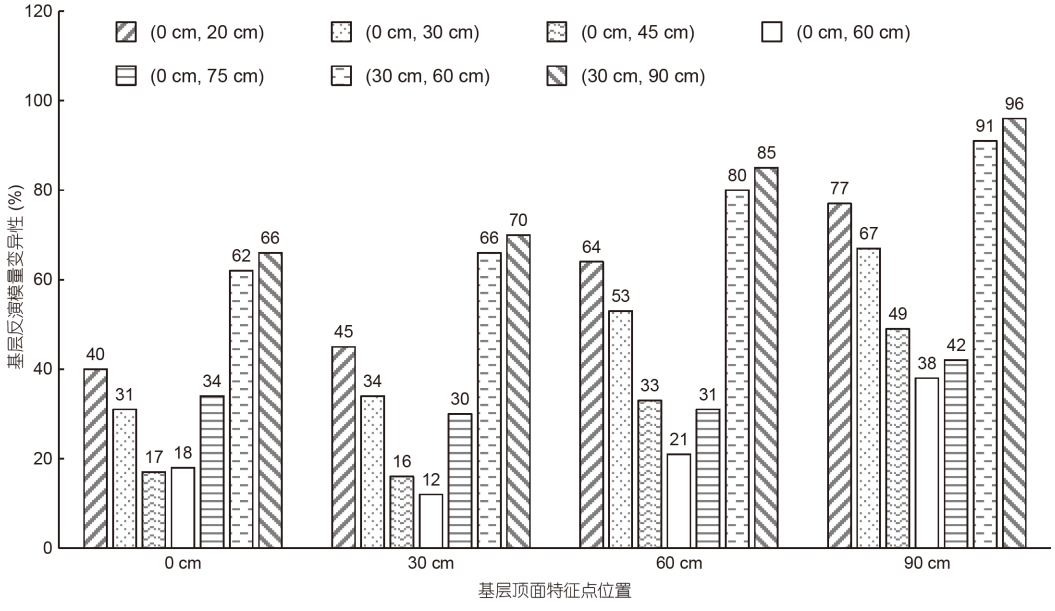


图 3 基层反演模量变异性分析

Figure 3 Variability of the backcalculated base moduli

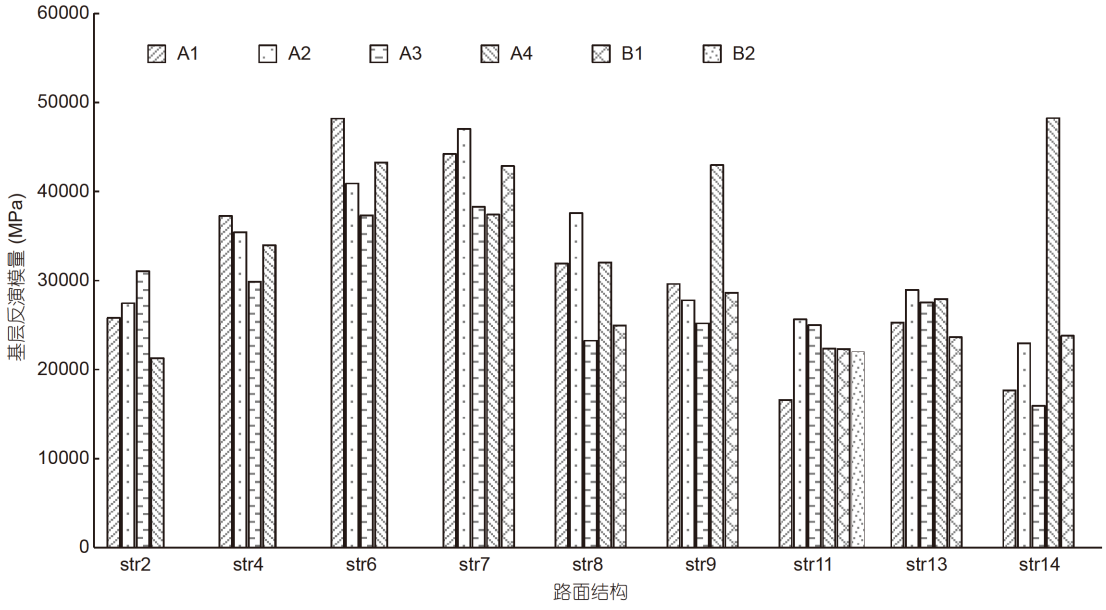


图 4 基层模量反演结果
Figure 4 Results of backcalculated base moduli

效果. 将同一路面结构逐层反演得到的基层模量进行变异性分析, 其中将str9和str14下基层的反演结果作为异常值不代入计算, 结果如图5所示. 除str8和str14的基层反演模量的变异性较大外, 其他各路面结构在不同路面厚度情况下基层反演模量的变异性均小于14%, 表明基于不同路面厚度的基层反演模量的一致性较好.

3 独立数据验证

为进一步说明本文特征点选取方法的准确性, 利用独立弯沉数据分析了上述特征点位置下基层反演模量的稳定性. 所使用的弯沉数据为山东省高速公路工程中采集的路面结构逐层弯沉盆数据. 第一种路面结构为半刚性基层, 第二种为粒料基层, 第三种为粒料基层+半刚性基层, 具体结构形式如表4所示, 其中GB表示级配碎石, 其他符号意义同表2. 结构1有12个断面的检测数据, 结构2和3各有5个断面检测数据.

利用本文选取的特征点位置, 对上述逐层检测的弯沉数据进行反演分析. 结构1的逐层检测弯沉数据所

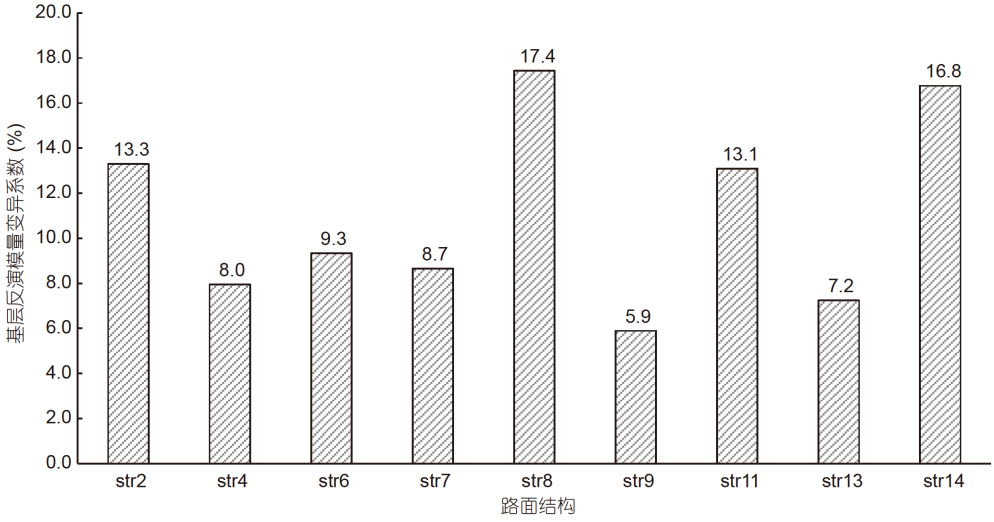


图 5 同一结构基层反演模量变异性
Figure 5 Variability of the backcalculated base moduli of the same structure

表 4 沥青路面结构信息

Table 4 Structure information of the asphalt pavement

路面结构	层位	材料	路面厚度(cm)
1	A1	AC13	4
	A2	AC20	6
	B1	CBG	10
	B2	CBG	10
2	A1	SMA13	4
	A2	AC20	6
	A3	ATB25	24
	B1	GB	20
3	A1	SMA13	4
	A2	AC20	6
	A3	ATB25	20
	B1	CBG	18
	B2	GB	15

对应的基层模量反演结果如图6(a)所示. 结构3只进行了前4个层位的计算, 并将计算得到路面结构中的基层结构模量与结构2的计算结果并入图6(b). 3种结构的基层反演模量的变异性结果如图7所示.

图6(b)中测点1~5为结构2的测点, 其他为结构3的测点. 从图6(a)和(b)的基层模量反演结果可以看出, 不同路面结构形式的同一测点处, 基于逐层检测的弯沉盆数据反演得到的基层模量数值较为接近, 具有很好的一致性. 图7的变异性结果中, 前12个测点为结构1的测点, 测点13~17为结构2的测点, 剩余测点为结构3的测点. 根据变异性分析的整体结果, 各路面结构利用逐层弯沉盆数据反演出的基层模量的变异性较小, 最小值为2.6%, 最大值未超过18%, 平均值为9.5%. 分结构

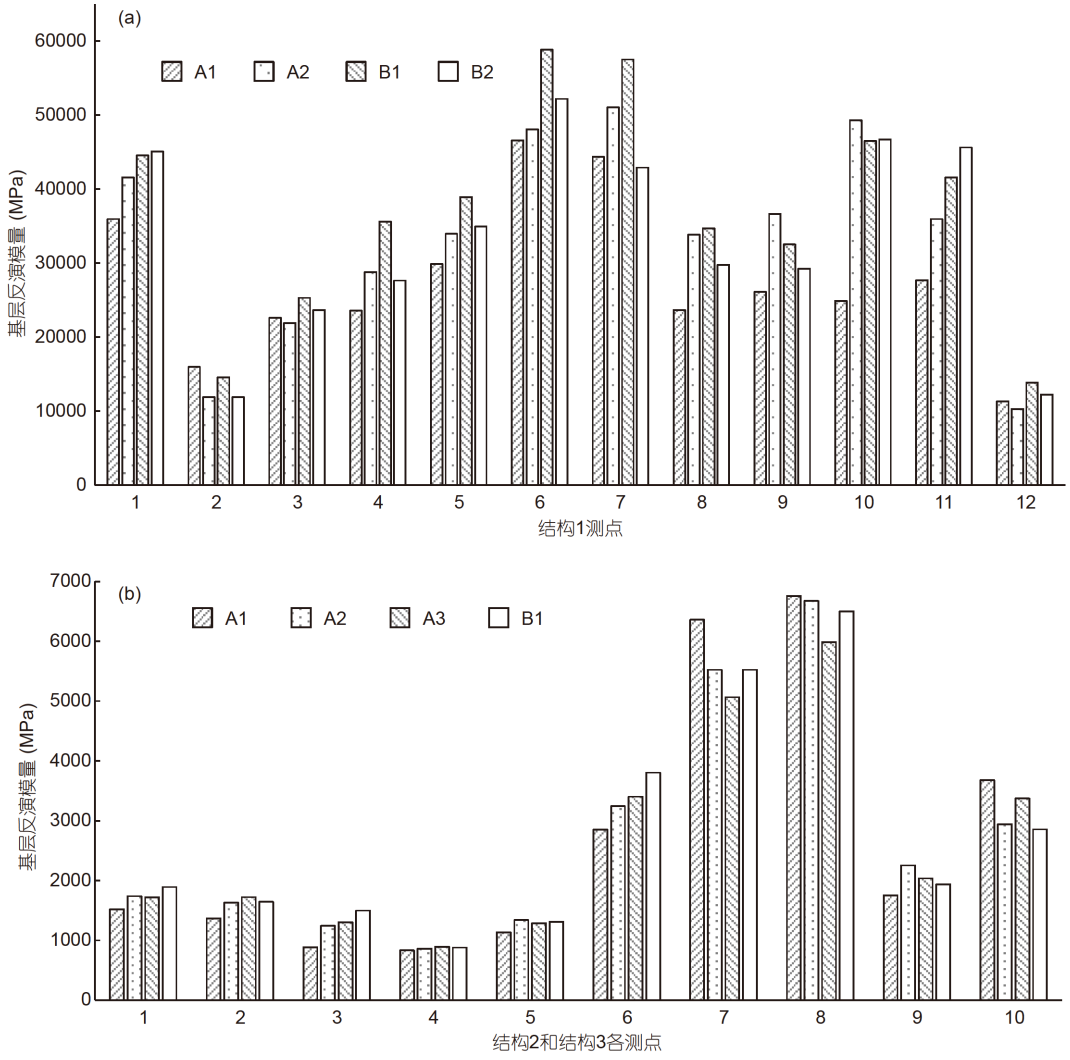


图 6 3种结构的基层模量反演结果. (a) 结构1; (b) 结构2和3

Figure 6 Backcalculated base moduli of three structures. (a) Structure 1; (b) structure 2 and 3

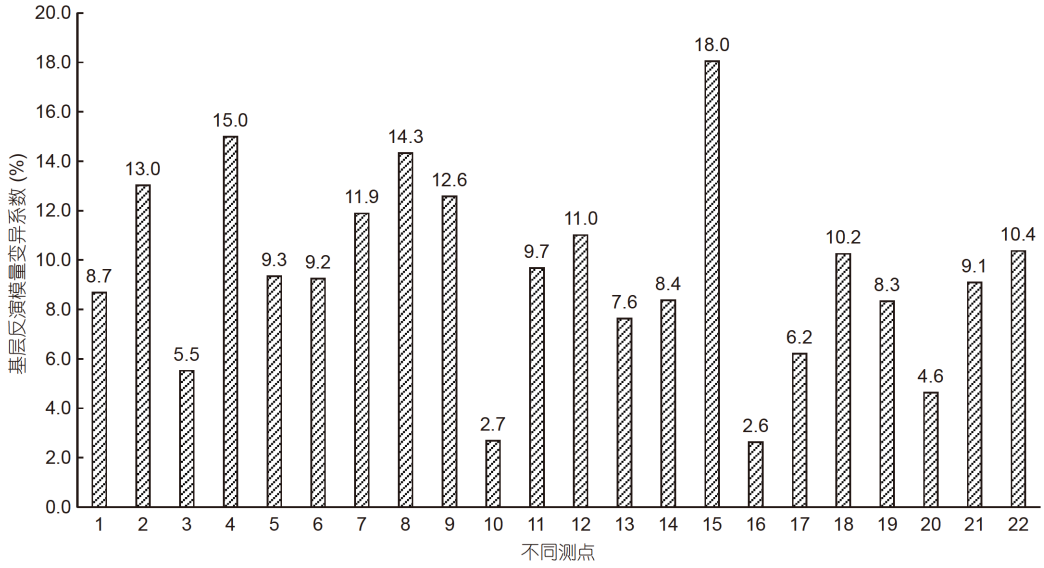


图 7 各结构基层反演模量变异性分析
Figure 7 Variability of the backcalculated base moduli of each structural layer

来看, 结构1的基层反演模量的变异性总体小于15%, 平均值为10.2%; 结构3的基层反演模量的变异性均值为8.5%, 且均小于10.5%. 另外, 虽然基层反演模量的变异性最大值出现在结构2, 但其他测点的变异性结果均小于8.5%, 可认为第15个测点的结果异常. 由图6(b)测点3的基层反演结果可以看出, 变异性过大的原因主要是基于上面层弯沉数据的基层反演模量偏小, 这可能是弯沉测量误差造成的; 若去除上面层的基层反演数据, 其基层反演模量的变异系数为8.1%. 综上, 独立数据验证结果表明, 本文提出的特征点位置及基于特征点的模量反演方法可用于精确反演其余路面结构层的模量值, 方法适用性强. 同时, 本文提出的反演方法的反演结果稳定、变异性小, 可满足工程需要.

4 结论

基于交通运输部RIOHTRACK足尺环道试验的不同路面结构不同层位检测的弯沉盆数据, 分析了不同特征点位置对基层反演模量变异性的影响, 并以不同层位弯沉盆反演出的基层模量具有良好一致性为原则, 进行了特征点位置的确定, 还利用独立弯沉数据对确定的特征点位置的准确性进行了验证. 主要结论总结如下:

(1) 对于实测弯沉盆数据, 特征点选取位置对逐层反演基层模量一致性具有显著影响. 当基层顶面特征点位置不变时, 随着面层顶面特征点位置远离荷载中心点, 基层反演模量的变异性呈现先减小后增大的趋势.

(2) 以逐层检测弯沉反演出的基层模量具有一致性的特点为原则, 确定了特征点的位置: 2层结构体系, 特征点位置选取为30 cm处; 3层结构体系, 特征点位置选取为荷载中心点和距离荷载中心点60 cm处. 基于选择的特征点位置, 利用弯沉规律法可以快速且更精确地反算模量.

(3) 利用独立数据验证了本文确定的特征点位置的准确性. 验证结果表明, 提出的方法可用于精确反演其他工程实例中路面结构层的模量值, 方法适用性强. 同时, 本文提出的反演方法结果稳定、变异性小, 可满足工程需要.

参考文献

1 Xu P H, Chen Z D. Test Technology of Road Subgrade and Pavement (in Chinese). Beijing: China Communications Press, 2000. 261–264 [徐培华, 陈忠达. 路基路面试验检测技术. 北京: 人民交通出版社, 2000. 261–264]

2 Sun L J. Transportation Infrastructure Management System: Theory and Practice (in Chinese). Beijing: China Communications Press, 2000. 196–261 [孙立军. 道路与机场设施管理学. 北京: 人民交通出版社, 2009. 196–261]

3 Huang X M, Deng X J. Measured deflection basin to evaluate the strength of pavement structure (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 1996, 18: 85–

88 [黄晓明, 邓学钧. 实测弯沉盆评价路面结构强度. 岩土工程学报, 1996, 18: 85–88]
4 Varma S, Kutay M E, Levenberg E. Viscoelastic genetic algorithm for inverse analysis of asphalt layer properties from falling weight deflections. Transp Res Record, 2013, 2369: 38–46
5 Zhu Y H. Backcalculation of asphalt pavement stiffness coefficient based-FWD deflection basin parameters (in Chinese). Master Dissertation. Guangzhou: South China University of Technology, 2016 [朱亚辉. 基于FWD弯沉盆参数的沥青路面刚度系数反算研究. 硕士学位论文. 广州: 华南理工大学, 2016]
6 Zha X D, Xiao Q M. Analysis of modulus back-calculation problem (in Chinese). In: Proceedings of the Fourth International Road and Airport Pavement Technology Conference. Beijing: China Communications Press, 2002. 160–163 [查旭东, 肖秋明. 模量反算问题的剖析. 见: 第四届国际道路和机场路面技术大会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2002. 160–163]
7 Ji Y G, Wang F M, Guo Z Y. Backcalculation for layer moduli of pavements based on falling weight deflectometer tests (in Chinese). China Civ Eng J, 2002, 35: 31–35 [姬亦工, 王复明, 郭忠印. 基于落锤式弯沉仪(FWD)动态数据的路面模量反演方法. 土木工程学报, 2002, 35: 31–35]
8 Meier R W, Alexander D R, Freeman R B. Using artificial neural networks as a forward approach to backcalculation. Transp Res Record, 1997, 1570: 126–133
9 Fwa T F, Tan C Y, Chan W T. Backcalculation analysis of pavement-layer moduli using genetic algorithms. Transp Res Record, 1997, 1570: 134–142
10 Fwa T F, Rani T S. Seed modulus generation algorithm for backcalculation of flexible pavement moduli. Transp Res Record, 2005, 1905: 117–127
11 Zha X D. Study on backcalculation of pavement layer moduli based on homotopy method (in Chinese). Doctor Dissertation. Xi'an: Chang'an University, 2001 [查旭东. 基于同伦方法的路面模量反算的研究. 博士学位论文. 西安: 长安大学, 2001]
12 Zang G S, Sun L J. Setting method of rigid layer depth based on consistency of subgrade modulus (in Chinese). J Tongji Univ (Nat Sci Ed), 2018, 46: 784–789 [臧国帅, 孙立军. 基于土基反演模量一致性的刚性层设置方法. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46: 784–789]
13 Zha X D. Summary of backcalculation methods of pavement layer moduli (in Chinese). J Traffic Transp Eng, 2002, 2: 1–6 [查旭东. 路面结构层模量反算方法综述. 交通运输工程学报, 2002, 2: 1–6]
14 Sun L J, Yoshitaka H, Yao Z K. A new method to backcalculation layer moduli for concrete pavements (in Chinese). China Civ Eng J, 2000, 33: 83–87, 99 [孙立军, 八谷好高, 姚祖康. 水泥混凝土路面板模量反算的一种新方法: 惰性弯沉法. 土木工程学报, 2000, 33: 83–87, 99]
15 Sun L J, Hu S, Zhang X N. Inertial point on deflection basin of concrete pavement and asphalt pavement (in Chinese). J Highway Transp Res Dev, 2001, 18: 1–5 [孙立军, 胡圣, 张小宁. 路面弯沉盆上的惰性点. 公路交通科技, 2001, 18: 1–5]
16 Zhang X N, Sun L J. Backcalculation of subgrade modulus for asphalt pavement based on method of inertial point (in Chinese). J Tongji Univ (Nat Sci Ed), 2004, 32: 39–42 [张小宁, 孙立军. 运用惰性点方法反算沥青路面结构地基模量. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32: 39–42]
17 Zhang X N, Sun L J. Backcalculating moduli of surface and base courses for asphalt pavement (in Chinese). J Tongji Univ (Nat Sci Ed), 2004, 32: 1386–1389 [张小宁, 孙立军. 沥青路面面层和基层结构模量的反算. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32: 1386–1389]
18 Zang G S, Sun L J, Chen Z. Back-calculating method for subgrade modulus based on virtual inertial points (in Chinese). J Southeast Univ (Nat Sci Ed), 2017, 47: 1227–1232 [臧国帅, 孙立军, 陈长. 基于虚拟惰性点的土基模量反演方法. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47: 1227–1232]
19 Zhu J, Sun L J. Determination of optimal backcalculation point for three layer structure modulus backcalculation of asphalt pavement (in Chinese). J Tongji Univ (Nat Sci Ed), 2017, 45: 203–208 [朱洁, 孙立军. 沥青路面三层结构模量反演最佳反演点的确定. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45: 203–208]
20 Zang G S. Back-calculation method for structural parameters of asphalt pavement based on identity points (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanghai: Tongji University, 2018 [臧国帅. 基于特征点的沥青路面结构参数反演方法. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2018]
21 Zhu J. Method of high-precision modulus backcalculation for multi-layer structure of asphalt pavement (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanghai: Tongji University, 2013 [朱洁. 沥青路面多层结构模量高精度反算方法研究. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2013]

Summary for “沥青路面结构层模量反演最佳特征点的确定”

Determination of optimal identity points for backcalculating the structural layer moduli of asphalt pavement

Yue Hu[1], Guoshuai Zang[2], Lijun Sun[1*], Liping Liu[1] & Huailei Cheng[1]

[1] *The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;*
[2] *Jiangsu Sinoroad Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210019, China*
* Corresponding author, E-mail: ljsun@tongji.edu.cn

The backcalculated structural moduli of asphalt pavement using the falling weight deflectomer (FWD) deflection basin data has been increasingly used for evaluating the bearing capacity of non-destructive pavement structures. The current backcalculation methods can be divided into 2 categories, i.e., one algorithm based on deflection basin matching and the other algorithm based on deflection basin law. The principle of the former algorithm is to find a set of structural layer moduli so that the theoretical deflection and the measured deflection have the highest matching degree, and the later algorithm uses some regular and special points according to the law of the deflection basin affected by the structural parameters to backcalculate layer moduli. Research has shown that the former algorithm has a problem in whether there is a unique solution and the inversion efficiency. While the basin law algorithm is able to generate a unique solution, which makes it more suitable for engineering applications. However, the identity points used in the current basin law algorithm were determined based on the theoretically calculated FWD deflection basins. The accuracy of these identity points needs to be further validated using the field measured FWD data. Therefore, in order to determine the optimal positions of the identity points accurately, this paper analyzed the law of backcalculated moduli of pavement structure based on the measured layer-by-layer deflection basins of different pavement structures. First of all, the influence of different identity points on the backcalculated base moduli was investigated using the deflection data from the full scale testing track of RIOH. Then, the optimal positions of the identity points were determined, based on the principle of the consistency of the backcalculated base modulus using the measured deflection basin data, which means that the backcalculated modulus values of base layers should be almost the same. Finally, the accuracy of the optimization identity point method was verified by independent deflection data. The results indicated that the positions of identity points had significant effects on the backcalculated moduli for the base layer. When the position of the base identity point was unchanged, the variability of the backcalculated base modulus tended to decrease first and then increase as the position of the surface identity points as far away from the load center. And according to the deflection data from the full scale testing track of RIOH, we concluded that, for the two-layers asphalt pavement, when the optimal position of the identity point was 30 cm far from the load center while the positions for three-layers asphalt pavement were 0 and 60 cm away from the load center, the backcalculated base modulus based on layer-by-layer deflection data had the best consistency. Based on the inversion analysis of the independent deflection data, the accuracy of the position of the identity points determined in this study was verified. The verification results showed that the modified method proposed in this study could be used to accurately backcalculate the modulus of the pavement structure layer in other engineering, and the method was highly applicable. At the same time, the method proposed in this study had stable results and low variability, which can meet the needs of engineering.

falling weight deflectometer, backcalculation, the basin law algorithm, consistency of the backcalculated base modulus, position of the identity point

doi: 10.1360/TB-2020-0094