

利用 FWD 数据反算模量方法研究

黄崇伟, 苏尔好, 周正峰

(同济大学, 上海市 201804)

摘要:通过总结国内外路面结构层模量反算方法的研究概况, 分析了图表法和回归公式法、迭代法、数据库搜索法、遗传算法和人工神经网络法五类方法的特性, 根据反算模量研究现状, 选取了回归公式法和迭代法进行模量反算, 结合反算模量的相关理论研究和经验总结, 从动荷载与静荷载、各结构层材料非线性、理论与实际的差异等方面分析了两种模量反算结果差异, 从而提出模量反算的进一步研究方向。

关键词:FWD; 模量反算; 公式回归法; 迭代法

中图分类号:U416.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2007)01-0094-03

0 引言

落锤式弯沉仪 FWD 是国内正在逐步发展的一种较先进的无破损弯沉检测设备, 所测路面弯沉数据可用于评估路面结构状况, 其中反算路面各结构层模量是最广泛、重要的用途之一。利用 FWD 实测弯沉反算路面结构层模量, 其有效性主要取决于路面结构模型、测试数据、反算方法和结果修正等因素。本文主要介绍常用的一些模量反算的方法, 并就各种反算方法的可靠性进行初步探讨。

国外对 FWD 数据反算各个结构层的模量开展了大量的研究工作。国内在这方面起步较晚。国内外对于模量反算采用的路面结构模型主要有线性和非线性两种, 模量反算方法主要有图表法和回归公式法、迭代法、数据库搜索法、遗传算法和人工神经网络法等五大类。

1 FWD 数据分析方法

通过 FWD 数据的分析方法可得出路面各结构层模量。目前常用的计算分析方法分析如下文。

图表法和公式回归法:通过研究各种弯沉盆参数(DBP, deflection basin parameters)与路面各层模量或应力应变关系, 得出回归公式或诺模图, 这种方法快速, 简便, 利于推广使用。并且通过表达式, 可以较为清晰地研究弯沉盆的特性, 研究各个因素堆反算模量的影响状况。这种方法的研究结果比较丰硕。

迭代法:即通过一组初始模量值, 基于理论分析模型计算理论弯沉盆, 并与 FWD 实测弯沉盆比较, 根据弯沉值差异确定模量修正值, 从而

获得一组新的模量, 依次进行迭代, 不断重复这一过程, 直至满足预先给定的收敛精度或迭代次数的要求为止。这种方法利于编程, 吸收不同的理论分析模型, 具有良好的扩展性。但是这种方法不可避免存在缺陷, 受到初始值、迭代方法和局部收敛标准的影响, 存在局部极小和解的唯一性。

数据库搜索法:以数据库为依托, 寻找满足弯沉盆拟和精度要求的模量组合。其中以 MODULUS 反算程序最为著名, 这种方法主要优点是计算速度快, 收敛稳定, 适合于路网普查, 这也是美国 SHRP 计算选定的反算软件。

人工神经网络法 (ANN, article neutral network)主要是利用人工神经网络的高度非线性映射能力, 以预先算好的弯沉数据、厚度、荷载等参数作为输入, 模量作为输出, 训练神经网络。目前普遍采用 BP 神经网络进行反算, 主要缺点在于噪音数据的合理选取, BP 网络的学习算法存在初始值和局部极小问题。

遗传算法和同伦算法是较新的反算方法。

2 应用软件迭代反算

首先假设各结构层模量(初始值)或模量范围, 采用弹性层状理论体系分析方法计算理论弯沉盆, 并与 FWD 实测弯沉盆进行比较, 根据实际弯沉与理论弯沉差异确定模量修正值, 从而获得一组新的模量。然后, 以此作为下轮迭代的初始值, 不断重复这一迭代过程, 直至满足预先给定的收敛精度或迭代次数的要求为止。通常迭代的收敛标准有绝对误差平方和、相对误差平方和两种。目前, 常见的主要模量反算软件如表 1 所示。

国内一些学者和工程技术人员基于大量的实验, 结合理论, 反复印证, 得出以下结论:

(1) 荷载传感系统误差比较小, 且得出的模

收稿日期:2006-10-30

作者简介:黄崇伟(1983-), 男, 浙江平阳人, 硕士研究生, 从事道路与铁道工程研究工作。

量误差也较小。

(2) 由厚度误差导致反算模量的误差较明显, 但如果把各结构层厚度误差控制在 $\pm 5\%$ 以内, 可使反算模量误差不超过 $\pm 15\%$ 。

(3) 用 FWD 弯沉数据反算的土基模量与承载板所得模量相差较大。

表 1 常用道面模量反算软件及反算方法					
反算方法	软件名称	主要开发者	初始模量	模量范围	收敛标准
迭 代 法	BAP	Almeida J R	需要	需要	绝对误差平方和
	BISDEF	Bush A J	需要	需要	绝对误差平方和
	BOUSDEF	Haiping Zhou	需要	需要	百分误差和
	CHEVDEF	Bush A J	需要	需要	绝对误差平方和
	ELMOD	Ullidtz P	不需要	可选	相对或绝对均方差
	DAPS	Thompson R	需要	需要	相对误差平方和
	ELSDEF	Jorlah l	需要	需要	绝对误差平方和
	EMOD	PCSIAW	需要	需要	相对误差平方和
	EVERCALC	Mahoney J P	需要	需要	绝对误差平方和
	FPEDDI	UddinW	自选	不需要	绝对误差平方和
	ISEM	Stubstad R	需要	需要	各弯沉相对误差
	MICHBAC	Harichandran R S	自选	可选	相对误差平方和
	MODCOMP	lrw in L	需要	需要	各弯沉相对误差
	NDPATER	Chua KM	不需要	不需要	弯沉系数和斜率系数
	PADAL	Brow S F	土基需要	可选	相对误差平方和

3 应用回归公式反算

回归公式是最终以数学函数的形式表达弯沉参数指标与路面结构状况指标之间的互相关系, 也是弯沉盆参数指标研究的主要目的。下文主要介绍 AASHTO 回归公式。

AASHTO 规范建议按照 ASTM D4694 和 D4695 的非破坏性弯沉检测规定进行 FWD 弯沉测试。一般量测间距为 100~1000 ft (3~30 m), 使用荷重为 9000 lbs (40 kN)。

(1) 地基模量反算回归公式

$$M_r = c \frac{0.24P}{d_r r}$$

式中: c ——反算值与实验室模量修正系数, 0.33;

M_r ——反算的地基模量 (psi);

P ——荷重 (lbs);

r ——距荷重中心水平向距离 (in);

d_r ——距离荷重中心 r 的路表弯沉值 (in)。

其中, r 的最小距离需满足:

$$a_c = \sqrt{a^2 + \left(D^3 \sqrt{\frac{E_p}{M_r}}\right)^2}$$

(2) 铺面层模量反算回归公式

$$d_o = 1.5Pa \left[\frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left(\frac{D^3 \sqrt{E_p}}{M_r}\right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}}}{E_p} \right]$$

式中: a ——承载板半径 (in);

D ——铺面层厚度, 路面各结构层厚度总和 (in);

d_o ——荷重中心处的弯沉值 (in), 需将弯沉值修正到标准温度 20℃时;

E_p ——铺面层模量 (psi);

其余符号含义同前。

4 模量反算算例

试验路选在正在改建的沪青平公路 K38+968.72~K39+440, 水泥混凝土路面结构和土基计算厚度如表 2 所示, 实测弯沉如表 3 所示。

表 2 水泥混凝土路面结构 (cm)			
水泥混凝土面层	粉煤灰三渣基层	沙砾垫层	土基
24	30	15	1000

表 3 FWD 各个测点弯沉数据									
编号	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)
距离/cm	0	20	35	55	75	105	135	175	215
A47/0.01 mm	84	77	74	73	69	64	58	49	40

4.1 应用软件迭代反算

本次反算采用的是 EVERCALC 专业反算软件, 计算所得的各结构层模量如表 4 及图 1 所示。

表 4 反算所得模量	
水泥混凝土面层(MP)	55 168.98
粉煤灰三渣基层及沙砾垫层(MP)	2 401.18
土基(MP)	153.64
平均 RMS 误差(%)	3.44

4.2 利用 AASHTO 回归公式反算

$$M_r = 46.68 \text{ (MP)}$$
$$E_p = 15\,081.78 \text{ (MP)}$$

利用 FWD 弯沉数据反算各层模量, 土基模量与承载板所得模量相差较大, 主要原因如下:

(1) 动荷载与静荷载

FWD 土基模量反演是对动态弯沉盆拟合, 可以认为是动模量, 传统的土基模量则是对承载板试验得到, 是静模量。而且室内试验及现场试验都表明, 动模量大于静模量。美国《AASSTO 设计指南》认为动模量是静模量的三倍, 国内有关研究土基动模量是静模量的两倍。

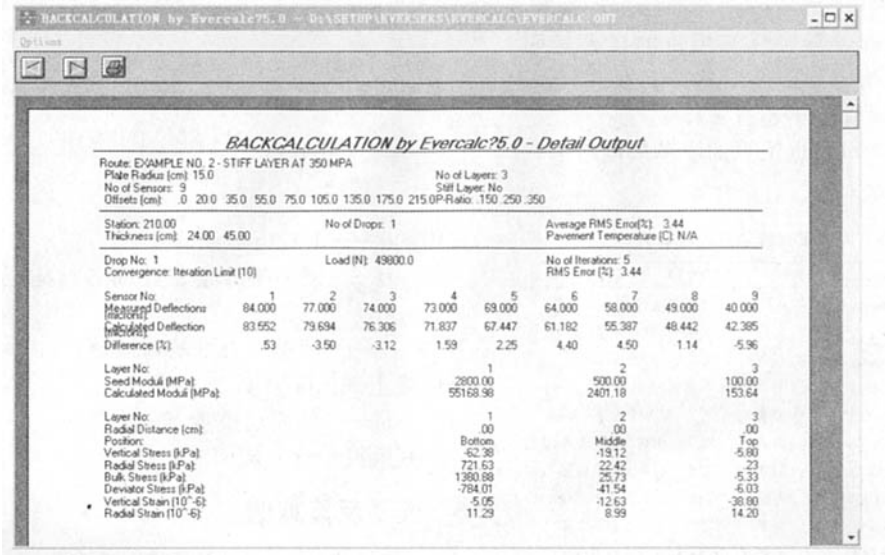


图 1 EVERCALC 软件反算结果

(2) 各结构层材料非线性

目前模量反算方法都是以多层线弹性模型为基础,而实际的道面材料是非线性的。一般而言,土基表层离中心处越远模量越大,在利用 FWD 弯沉数据进行模量反算时,通常认为土基模量在垂向和径向都是不变的,这样所得模量综合值往往比荷载中心下土基表层的模量要大很多。

(3) 理论与实际的差异

各种迭代反算方法大多是基于弹性层状体系理论,然而弹性层状体系并未考虑路面路基材料的非线性。按照弹性层状体系理论,离荷载较远处仍有一定的弯沉量。然而现实情况并非如此,由于路面材料是由集料和粘结料的组合,集料之间的嵌挤作用并非达到理想状态,有部分集料与集料之间的荷载传递是通过粘结料的粘结力而发挥作用,这种不理想的嵌挤状态大大降低了混合料传递荷载的能力。因此,随着测量半径的增加,实测弯沉值的减小幅度大于理论弯沉值的减小幅度。根据大量 AASHTO 试验路弯沉数据的研究表明:距荷载一定距离以外的路面的弯沉是由土基引起的,因此实测弯沉数据减小的幅度越大,反算所得的土基模量偏差就越大(见图 2)。

5 结论

应用 FWD 检测路基路面的结构强度具有承载板试验所不具有的优点,国内外对此研究颇多,但迄今为止,此问题并未得到完全解决。这不仅源

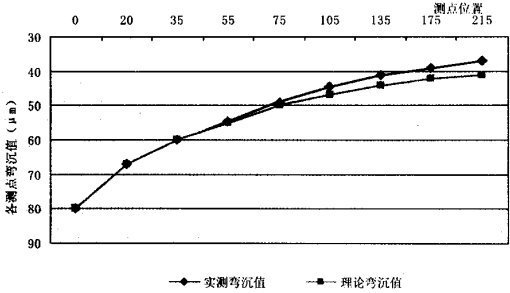


图 2 实测弯沉与理论弯沉的差值

于反算问题本身的复杂性,需要研究人员扎实的数学力学功底和敏感的洞悉问题本质的能力,而且还限于路面结构层体系理论的局限性。因此,解决本问题需要不同的思路,需要研究在轴载作用下的路面弯沉响应情况,研究路面结构层集料之间的嵌挤作用和荷载传递能力。需要研究实际弯沉和理论弯沉之间的关系,通过差值修正,从根本上解决路面模量反算问题。

参考资料

[1] 查旭东.路面结构层模量反算方法综述[J].交通运输工程学报,2002(4):1-5.
[2] 倪富健,邓学均.柔性路面结构层模量反算方法研究[J].中国公路学报.
[3] 姚祖康.路面工程[M].同济大学出版社,2001.
[4] 孙立军,胡圣,张小宁.路面弯沉盆上的槽性点[J].公路交通科技,2001(6):1-5.
[5] 孙瑞华.反算模量误差分析[D].同济大学硕士毕业论文,2005.