

文章编号:1673-9469(2009)02-0019-03

基于迭代法的柔性路面模量动态反分析

王振兴,韩亚强

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:根据系统识别法的基本原理,采用以灵敏度分析为基础的迭代法调整参数,对柔性路面结构进行位移动态反分析,编制柔性路面结构模量反算程序。研究结果表明,本文的反算方法稳定收敛,初始值对反算结果影响很小,反算结果精度较高,可在实际工程中应用。

关键词:有限元法;系统识别法;动态反分析

中图分类号: U416.221

文献标识码: A

Dynamic inverse - analysis of modulus for flexible pavement systems based on iterative method

WANG Zhen-xing, HAN Ya-qiang

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: According to the basic theory of system identification, parameters were adjusted by using iterative method based on sensitivity analysis. Modulus backcalculation program of the flexible pavement system was developed. The results show that the backcalculation is high - precision, stably convergent and nearly independent of the original value.

Key words: finite element method; system identification method; dynamic inverse - analysis

20世纪70年代落锤式弯沉仪(FWD)引入路面检测评价系统以来,以其高速、可靠、无损、高精度、信息量丰富等优点得到世界各国的广泛应用,根据FWD实测弯沉盆反算路面结构层模量也成为路面工程领域中的热点研究课题,并取得了丰硕的成果^[1]。1973年美国F. H. Scrivner等人根据Burnister双层体系解,首次提出了FWD弯沉盆反算模量的方法,并编制了反算的诺漠图^[2]。进入80年代后,随着计算机技术和数值分析方法的发展,多种基于Hankel积分变换与有限元的弹性层状体系解的模量反算程序得到开发,如基于数学规划法的BISDEF和CHEVDEF,基于数据库搜索法的MODULUS;90年代人工神经网络和遗传算法等优化方法也被引入路面模量反算问题中^[3]。我国在路面模量反算方面的研究起步较晚,1997年倪富健等人采用了POWELL方法进行模量反算,王复明教授采用了系统化识别法开发了SIDMOD软件^[4]。

目前比较成熟的反算方法大多建立在拟静力

反算的基础上,拟静力方法忽略了惯性力和阻尼的影响,这与FWD所施加的动力荷载不符合,并且路面结构材料对时变因素具有相当的敏感性。为解决这一问题,本文采用动态分析法^[5],进行拟动力反演,能够更好的模拟路面结构的实际情况。

1 弹性层状体系模型

弹性层状体系是路面结构设计和分析的理论基础,弹性层状体系力学模型如图1所示, E_i , h_i , μ_i ,分别为第*i*层的弹性模量、厚度和泊松比。弹性层状体系可以看成是多个有限厚弹性层与弹性半空间组成。

2 路面结构动力响应

2.1 有限元模型

路面结构受车轮荷载作用可视为空间轴对称

问题,从而只研究 r, z 平面上的截面部分。各层水平方向和最底层竖向无限延伸,研究表明采用 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的计算单元能够满足精度要求,层间连续接触,在径向边界和深度边界的节点处,按照粘性人工边界条件^[6]设置节点。网格划分时采用非完全均匀划分,距荷载近处网格较密。根据对称性可采用矩形环单元进行网格划分,有限元模型如图2所示。

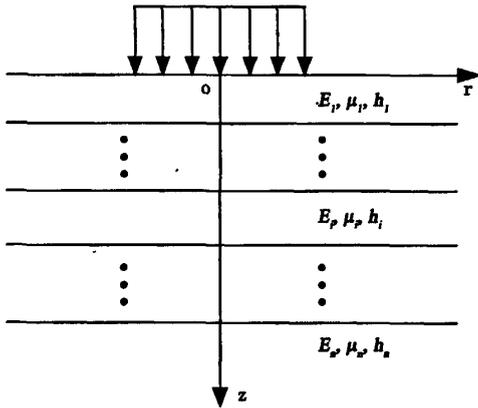


图1 弹性层状体系的力学分析模型

Fig.1 Mechanical analysis system model of elastic layered system

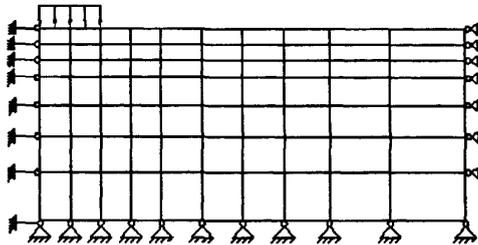


图2 路面结构有限元模型

Fig.2 Finite element model of the pavement structure

2.2 动力平衡方程

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{P\} \quad (1)$$

其中 $[M]$ 是柔性路面结构的整体质量矩阵; $[K]$ 是柔性路面结构的整体刚度矩阵; $[C]$ 是柔性路面结构的整体阻尼矩阵; $\{P\}$ 是由外荷载形成的等效节点向量;

$\{\delta\}$ 、 $\{\dot{\delta}\}$ 、 $\{\ddot{\delta}\}$ 分别是位移、速度和加速度向量。

2.3 动力方程求解

将 $0 \sim t$ 时间段 n 等分,即取 $\Delta t = t/n$ 。则 $t + \Delta t$ 时刻有

$$[M]\{\delta_{i+\Delta t}\} + [C]\{\dot{\delta}_{i+\Delta t}\} + [K]\{\delta_{i+\Delta t}\} = \{R_{i+\Delta t}\} \quad (2)$$

利用拉格朗日中值定理,在 $t + \Delta t$ 时刻的速度矢量可表示为

$$\{\dot{\delta}_{i+\Delta t}\} = \{\dot{\delta}_i\} + \{\ddot{\delta}_i\}' \Delta t \quad (3)$$

近似假设

$$\{\ddot{\delta}\}' = (1 - \gamma)\{\ddot{\delta}_i\} + \gamma\{\ddot{\delta}_{i+\Delta t}\} \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (4)$$

则

$$\{\delta_{i+\Delta t}\} = \{\delta_i\} + (1 - \gamma)\{\dot{\delta}_i\} \Delta t + \gamma\{\dot{\delta}_{i+\Delta t}\} \Delta t \quad (5)$$

由位移得泰勒展开式,当采用类似于 $\{\ddot{\delta}\}'$ 的假设后,便有

$$\{\delta_{i+\Delta t}\} = \{\delta_i\} + \{\dot{\delta}_i\} \Delta t + (1 - 2\beta)\{\ddot{\delta}_i\} \Delta t^2 / 2 + 2\beta\{\ddot{\delta}_{i+\Delta t}\} \Delta t^2 / 2, 0 \leq 2\beta \leq 1 \quad (6)$$

以(3)、(6)、(7)为基本公式,从 $t = 0$ 时刻得状态矢量 $\{\delta_0\}$ 、 $\{\dot{\delta}_0\}$ 、 $\{\ddot{\delta}_0\}$ 出发,可以逐步求出 $i \Delta t$ ($i = 2, 3, \dots, n$) 时刻得状态矢量 $\{\delta_{i\Delta t}\}$ 、 $\{\dot{\delta}_{i\Delta t}\}$ 、 $\{\ddot{\delta}_{i\Delta t}\}$ 。

3 系统识别法

3.1 系统识别方法的基本原理

系统识别法选用一个数学模型来模拟未知系统,根据系统的输入和输出来确定系统的特性,然后修改模型参数,使其与实际系统的性能尽可能接近,系统识别的过程如图3所示。

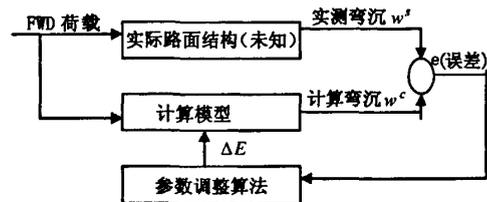


图3 路面结构反分析过程

Fig.3 Inverse-analysis of pavement structure

3.2 参数调整方法

参数调整方法采用以灵敏度分析为基础的迭代法,其实质就是用位移对被调整参数的灵敏度来求参数的调整量。

弹性层状体系力学模型可表示为

$$w^i = f(E_1, E_2, \dots, E_n, x) \quad (7)$$

式中 w^i 表示位移向量; E_1, E_2, \dots, E_n 表示 n 个待识别参数(这里将阻尼系数也用 E_i 表示); x 为空间向量,由控制点的位置决定。用向量 E 表示 $(E_1, E_2, \dots, E_n)^T$, 则第 k 个控制点的位移为

$$w_k = f_k(E) \quad (8)$$

将上式用泰勒级数展开,取其一阶近似量,则有

$$e_k = f_k(E + \Delta E) - f_k(E) = \nabla f_k \times \Delta E = \frac{\partial f_k}{\partial E_i} \Delta E_i$$

$$\Delta E_1 + \frac{\partial f_k}{\partial E_2} \Delta E_2 + \dots + \frac{\partial f_k}{\partial E_n} \Delta E_n \quad (9)$$

式中 ΔE 代表参数的调整量, e_k 表示参数调整后计算位移与实测位移间的误差量。设

$$r = (e_1/f_1, e_2/f_2, \dots, e_n/f_n)^T, \alpha = (\Delta E_1/E_1,$$

$$\Delta E_2/E_2, \dots, \Delta E_n/E_n)^T, [F] = \left[\frac{\partial f_k}{\partial E_i} \times \frac{E_i}{f_k} \right] \quad (k =$$

1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n)。

$$\text{则由(9)式可得 } r = [F]\alpha \quad (10)$$

误差向量 r 由模型位移和实测确定,灵敏度矩阵 $[F]$ 通过变量摄动来确定。求解(10)可得模量的调整量 α , 由此又确定了一套新的参数:

$$E^{k+1} = E^k(1 + \alpha) \quad (11)$$

上述运算反复进行,直至达到精度要求。

根据上述反算原理和路面弯沉求解方法,编制路面结构层模量反算程序。

4 实例分析

某柔性路面结构,面层、基层厚度分别为 230mm、800mm,土基为无限深;各层密度分别为 2 100Kg/m³、2 000Kg/m³、1 900Kg/m³;各层泊松比为 0.35、0.35、0.4;各层模量分别为 6 348MPa、1 068MPa、230MPa;阻尼系数 $\alpha = 0.1, \beta = 0.01$;FWD 荷载 50kN,加载板半径 150mm,相应压强为 693kPa。各弯沉传感器分别距荷载中心 0mm, 203mm, 254mm, 457mm, 610mm, 914mm, 1219mm, 1524mm, 1829mm;对应最大弯沉分别为 92.5 μ m, 71.5 μ m, 62.2 μ m, 53.2 μ m, 46.0 μ m, 37.0 μ m, 30.9 μ m, 26.4 μ m, 23.0 μ m,要求对各层模量进行反演。

实际计算时,为满足精度要求,土基深度取

30m。迭代初始值分别取如下两组数值:

$$(I) E_1^0 = 1.2E_1, E_2^0 = 0.9E_2, E_3^0 = 0.8E_3$$

$$(II) E_1^0 = 0.7E_1, E_2^0 = 1.4E_2, E_3^0 = 1.8E_3$$

(I)组各参数的初始值与目标值之差在 -20% ~ 20%之间,(II)组各参数初始值相对于目标值的变化范围为 30% ~ 80%。反算结果见表 1。

表 1 各层模量反演结果

Tab. 1 Backcalculation results of modulus

	面层模量 E_1 (MPa)	基层模量 E_2 (MPa)	土基模量 E_3 (MPa)	
	理论值	6348.000	1068.000	230.000
(I)	初始值	7617.600	961.200	184.000
	反算值	6352.824	1066.505	229.057
(II)	初始值	4443.600	1495.200	414.000
	反算值	6349.650	1064.903	228.574

由反算结果可以看出,反算初始值的选取对反算结果影响很小,与目标值相差较大的初始值反演结果也能达到较高的精度。

5 结论

利用系统识别法对路面结构层模量进行动态反分析,较静力分析更切合实际。反算方法收敛性较好,初始值对反算结果影响很小,反算精度较高,可用于工程实践。

参考文献:

- [1] 魏翠玲,徐海滨,韩小斌,等.沥青路面模量反演方法研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(1): 1-3.
- [2] 伍大玮.遗传算法在路面结构动态时域反分析[D].郑州:郑州大学,2004.
- [3] 查旭东.基于人工神经网络的路面模量反算[J].交通运输工程学报,2002,2(2):12-15.
- [4] 夏永旭,王秉刚.道路结构力学计算[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [5] 魏翠玲,周晶,王复明.粘弹性层地基的动态响应[J].工程力学(增刊),1999,(III):856-860.
- [6] 郝大力.路面性能的评价和分析[D].西安:长安大学,2000.

(责任编辑 闫纯有)