

空间地基有限元分析及反问题

姬亦工¹,杜朝伟²,王复明²,栾茂田¹

(1.大连理工大学土木工程系,大连 116024;2.郑州工业大学水利与环境工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要:提出应用 20 结点等参有限元分析弹性空间地基,进而根据系统识别原理和灵敏度分析理论,建立了地基材料参数的反分析方法.计算结果表明,该方法与现有结果符合较好.从而为进一步深入研究落锤式弯沉仪(FWD)在各种路基、路面(刚性路面、柔性路面和复合式路面)以及建筑物地基的结构承载能力评价提供基础.

关键词:20 结点等参有限元;系统识别;路面;路基;落锤式弯沉仪

中图分类号:TU 470 文献标识码:A

0 引言

地基材料参数反演分析的研究具有广泛的工程应用价值^[1].国内外大量工程实践经验表明,地基材料的强度直接影响其上部结构的工程质量.因此在建造和施工阶段,如能利用反分析技术对地基进行准确的分析,对于及时、准确地检验和控制施工质量将具有重要意义.

本文提出了应用空间 20 结点等参有限元来分析弹性地基,并基于落锤式弯沉仪(FWD)实测数据、系统识别原理以及灵敏度分析理论^[2,3],建立了地基材料的反分析方法,并初步将其应用于柔性路面材料的参数识别,取得了较为满意的结果.从而为进一步研究路基、路面和建筑物地基的结构性能提供基础.

1 弹性地基模型

三维空间层状地基模型如图 1 所示,将地基进行三维剖分,竖向结点非均匀分布在区间[0, H]上,并使地基层间交界线通过结点.根据文献[4]的结论,若地基的范围选取得足够大,地基的边界效应将可忽略.因此,本文可以取较大的弹性地基模拟无限弹性地基.取地基的位移模式为^[5]

$$u = \sum_{i=1}^{20} u_i N_i, v = \sum_{i=1}^{20} v_i N_i, w = \sum_{i=1}^{20} w_i N_i \quad (1)$$

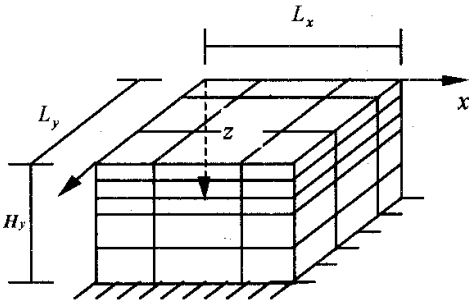


图 1 弹性地基的空间离散
坐标变换式为

$$x = \sum_{i=1}^{20} x_i N_i, y = \sum_{i=1}^{20} y_i N_i, z = \sum_{i=1}^{20} z_i N_i \quad (2)$$

其形函数为

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \zeta_0)(1 + \eta_0)(1 + \zeta) \quad (\zeta_0 + \eta_0 + \zeta_0 - 2 \quad i = 1, 2, \dots, 8);$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 - \zeta^2)(1 + \eta_0)(1 + \zeta_0) \quad (i = 9, 10, 11, 12);$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 - \eta^2)(1 + \zeta_0)(1 + \zeta_0) \quad (i = 13, 14, 15, 16);$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 - \zeta^2)(1 + \zeta_0)(1 + \eta_0) \quad (i = 17, 18, 19, 20),$$

式中, $\zeta_0 = \zeta_i \zeta, \eta_0 = \eta_i \eta, \zeta_0 = \zeta_i \zeta.$

收稿日期:1999-11-08,修订日期:2000-04-10

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(19525205)

作者简介:姬亦工(1972-),男,河南省郑州市人,大连理工大学博士研究生,主要从事地基与结构相互作用和结构材料参数反演方面的研究.

万方数据

利用弹性力学的变分原理^[5],可以得到以下单元方程:

[K]{δ}= {R}; (3)

[K]= ∫∫∫[B]^T[D][B]dxdydz = ∫₋₁¹∫₋₁¹∫₋₁¹[B]^T[D][B]|J|dξdζdη;(4)

{R}= ∫[N]^T{P}dV = ∫₋₁¹∫₋₁¹∫₋₁¹[N]^T{P}|J|dξdζdη. (5)

落锤式弯沉仪(FWD)的均布荷载作用于弹性地基表面,在局部坐标中,设在ζ=±1的面上作用有分布压力p,则式(5)简化为

{R}= ∫_s[N]^T{p}ds, (6)

式中{R}为分布压力,是局部坐标ζ,η,ξ的函数;S为压力作用的面积.

除受荷面上的8个结点的形函数之外,其他12个结点的形函数在ζ=±1时均为零,因此只有受荷面的8个结点上不为零的等效结点荷载.

{X₁}{Y₁}{Z₁}= ∫_sq(ζ)_{ζ=±1}{N_i000N_i000N_i}× {ẏ_ηẏ_ξ-ẏ_ηẏ_ξẏ_ηẏ_ξ-ẏ_ηẏ_ξẏ_ηẏ_ξ-ẏ_ηẏ_ξ}dηdξ, (7)

式中i为受荷面上的8个结点.

在由整体坐标求局部坐标的过程中,设局部坐标为x_i,y_i,z_i,整体坐标为x_j,y_j,z_j,构造函数

u= ∑_{i=1}⁸N_ix_i-x_j;v= ∑_{i=1}⁸N_iy_i-y_j; w= ∑_{i=1}⁸N_iz_i-z_j, (8)

该式为常见的非线性方程组,可以根据u,v,w的值趋近于零这一收敛条件,求出3个局部坐标的值.同理,也可以通过给定初值x_{0i},y_{0i},z_{0i}迭代解出x_i,y_i,z_i.

2 系统识别反分析方法

系统识别也叫结构辨识或结构识别,它借用近代控制理论,研究如何根据已知的系统输入和输出来确定系统的模型参数.根据系统识别原理^[2],可以建立空间地基材料的反分析方法,其基本过程如图2所示.

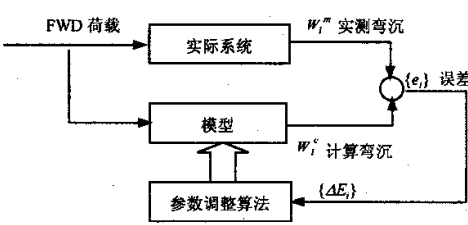


图2 系统识别基本原理

(1)利用FWD检测系统对现有结构进行现场非破坏性试验,观测地基在已知荷载作用下的变形(弯沉盆);

(2)应用所建的地基力学模型,计算在相同荷载作用下结构的位移(正分析);

(3)建立模型修改算法,逐步调整模型参数,使计算结果与观测结果之间的误差达到最小.

以灵敏度分析为基础,可建立控制方程:

[F]ΔE= {e}, (9)

其中,ΔE,{e}分别表示参数调整向量和弯沉误差向量[F]为灵敏度矩阵,其计算方法及方程求解方法见文献[2].

{ΔE}= [ΔE₁ ΔE₂..... ΔE_n]^T; {e}= [Δe₁ Δe₂..... Δe_m]^T.

3 数值算例

以系统识别原理为基础的反演分析方法已在结构参数识别上得到广泛的应用^[1,3].应用本文分析方法初步对柔性路面结构的材料参数进行了反演分析,文献[6]为河南省道路检测中心开发的SID MOD(路面模型采用轴对称求解,反分析方法采用系统识别方法)反分析程序所得结果.

例1:三层柔性路面结构,面层的厚度h₀=0.213 m,泊松比μ₀=0.40;基层的厚度h₁=0.213 m,泊松比μ₁=0.35;土基的厚度h₂=5.666 m,泊松比μ₂=0.40.反演结果见图3~图5.

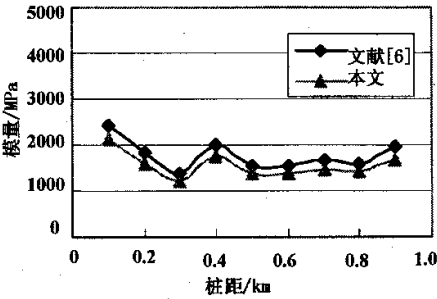


图3 面层模量反演结果

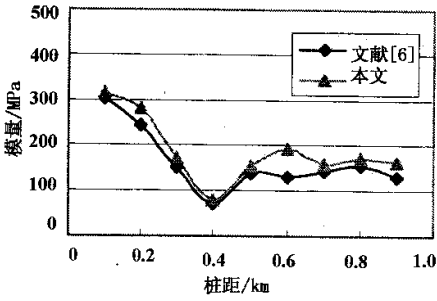


图 4 基层模量反演结果

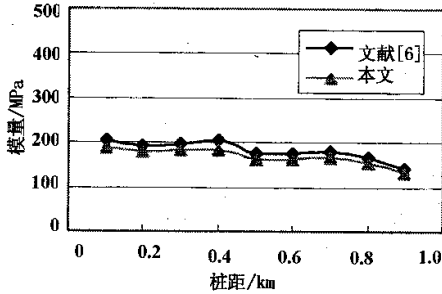


图 5 土基模量反演结果

5 结束语

本文对弹性空间地基及其反分析方法进行了较为系统的研究,进而将其应用到识别柔性路面

结构材料参数,实际算例可以看出,本文基于系统识别原理建立的结构材料性能的反演分析方法是成功的.该方法为进一步研究落锤式弯沉仪(FWD)在路基、路面以及建筑物地基的结构承载能力评价提供了可行途径,具有重要的实际应用价值.

参考文献:

[1] 王复明,刘文廷.高等级公路无损检测与评价——工程力学反问题研究[A].杨卫,郑泉水,靳征谟.走向 21 世纪的中国力学[C].北京:清华大学出版社,1996.230-238.

[2] WANG Fu-ming,LYTTON R L. System identification method for backcalculating pavement layer properties[J]. Transportation Research Record,1993(1384):1-7.

[3] 王复明,姬亦工,乐金朝.多层弹性地基板材料性能的反演分析[J].固体力学学报,1999,20(1):76-80.

[4] WOLF J P.土-结构动力相互作用[M].吴世明,唐有职,陈龙珠,等译.北京:地震出版社,1989.

[5] 王勖成,邵敏.有限单元法基本原理与数值方法[M].北京:清华大学出版社,1988.

[6] 王复明,刘文廷.“八五”国家重点科技攻关项目高等级公路无损检测与 CAE 技术研究报告[R].郑州:郑州工业大学,1996.65-67.

Material Properties Backcalculation and Element Method for the Elastic Foundation

Ji Yi-gong¹, DU Chao-wei², WANG Fu-ming², LUAN Mao-tian¹

(1. Department of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. College of hydraulic & Environmental Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

Abstract :A 20-node isoparametric element is developed to analyze the elastic foundation. According to the system identification method, the backcalculating program is developed to determine the property parameters of the elastic foundation rigid pavement. The numerical results show that good agreement between reference and this method can be achieved. Therefore practical and versatile analysis access is established for the Falling Weight Deflectometer (FWD) on evaluation of capacity of pavement (subgrade, rigid pavement, flexible pavement and composed pavement) and foundation of structures.

Key words :20-node isoparametric element; system identification method; pavement; subgrade; falling weight deflectometer