

# 采用地震技术预测路基沉降量的方法研究

李修忠<sup>1</sup>, 芮勇勤<sup>2</sup>, 卢成明<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 武汉市 430074; 2. 东北大学 沈阳市 110004)

**摘 要:** 采用有限元法求解比奥(Biot)固结方程计算路基沉降量是一种常用方法,通过三轴压缩试验来求取相应的弹性参数则耗时耗资。根据路基土的密度、速度与弹性参数(如弹性模量  $E_s$  和泊松比  $\mu$ )之间的关系,将速度和密度引入到有限元刚度矩阵方程来求解比奥固结方程,讨论了综合地震勘探在沉降检测与预测中的应用。理论模拟分析和实际应用结果表明,将地震技术用于地基沉降量计算中是有效的。

**关键词:** 路基工程; 地震技术; 路基沉降; 检测与预测

在高速公路和铁路建设中,路基工后沉降是一个严重问题,对路基沉降趋势的预测具有重大意义。在过去的几年中,很多专家都曾对其进行过深入的研究。在地基沉降量计算方面,有很多基于土工试验的方法,如  $e-\lg p$  曲线法、应力路径法、太沙基(Terzaghi)理论和比奥(Biot)固结理论等方法,但这些方法周期长、耗资大;而以包括地震映像方法和瑞雷波方法在内的地震技术,则以其简便、快捷的特点,开始被广泛应用于多个领域<sup>[1~3]</sup>。一般情况下,路基材料弹性参数可以通过地震方法来获得,并可以用下面的方程组由密度、速度和其他弹性参数表示出来:

$$\begin{cases} E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \\ K = \rho (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \\ E_t = \rho V_s^2 \\ \mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \\ \lambda = \rho (V_p^2 - 2V_s^2) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $K$  为体变模量;  $E_t$  为剪切模量;  $\mu$  为泊松比;  $\lambda$  为拉梅常数。

根据式(1)的方程组,在求解比奥固结方程时,将速度和密度参数引入FEM 刚度矩阵,然后讨论其解并得出如下结论:采用地震技术可以在避免进行复杂的土工试验情况下,快速获得连续变化的地基沉降量数据。

## 1 相邻道瞬态瑞雷波法

相邻道瞬态瑞雷波法<sup>[3]</sup>是一种新的浅层地震勘探方法。它首先采用  $\tau-p$  变换,由CMP 记录提取和分离出瑞雷波,然后由相邻道计算频散曲线,再通过反算求取介质的横波速度和物理特征值。采用这种方法获得的天然地基横波速度,由于避免了平均效应,较之采用多道方法计算频散曲线,所获得的结果具有更高的分辨率和检测精度。

纵波速度可以通过对天然地基进行地震映像勘测,由测孔资料标定对地震数据进行解释获得。

## 2 Biot 固结方程

由FEM 求解的比奥固结方程<sup>[1]</sup>(Biot, 1942),从1969 年开始就被用于沉降量的计算<sup>[4]</sup>(Sandhu R. S. 和Wilson, 1969)。由该固结方程表达平面问题的有限元公式为:

$$\begin{bmatrix} \bar{K} & K' \\ K'^T & \tilde{K} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\delta \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $R$  为荷载;  $\Delta\delta$  为  $\Delta t$  时间内在  $x$  和  $y$  方向上的位移量;  $\beta$  为超孔隙水压力。

每结点包含 4 个单元的结点刚度矩阵:

$$\bar{K} = \sum_e \sum_{l=i,j,m} \iint [B]^T [D] [B] dx dz \quad (3)$$

对于平面问题而言,矩阵  $[D]$  为:

$$[D]=\frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}\begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $E$  为弹性模量; $\mu$  为泊松比。

从岩土试验来看,弹性参数  $E$  和  $\mu$  通常由三轴抗压试验获取,其结果常常受到取样和试验器材因素影响。为此,力图通过把方程(1)代入方程(4)来求解方程(2),进行用地震技术取代钻孔取芯和土工试验的尝试,探索获取岩土弹性参数  $E$  和  $\mu$  的新方法。

3 数学模拟

为讨论  $V_s$ 、 $V_p$  和路基沉降量之间的关系,利用

表1 所示的速度参数和图1 所示的结构参数建模,在连续荷载作用下模型划分为 800 个三角形单元。

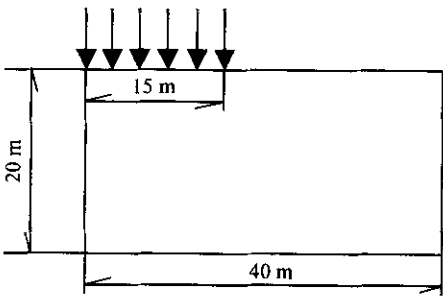


图 1 模型结构示意图

假定模型底部和两侧不透水,顶面可以排水;底部边界被约束,左右边界在水平方向上约束,上表面为自由界面。图 2 为加荷过程曲线变化。

表 1 数学模型参数

位置/m	3.0			10.0			20.0		
深度 m	$V_p$ m/s	$V_s$ m/s	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$V_p$ m/s	$V_s$ m/s	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$V_p$ m/s	$V_s$ m/s	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>
0.0~2.0	510	220	1.80	510	220	1.80	510	220	1.80
2.0~3.0	460	150	1.75	460	150	1.75	460	150	1.75
3.0~9.0	420	100	1.70	480	160	1.75	420	100	1.70
9.0~12.0	480	160	1.75	480	160	1.75	480	160	1.75
12.0~18.0	520	210	1.80	520	210	1.80	520	210	1.80

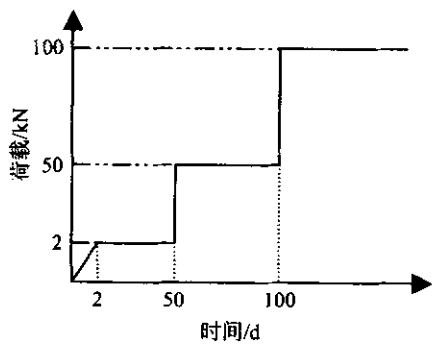


图 2 连续加载曲线

虽然  $V_s$ 、 $V_p$  速度变化与最终沉降量之间的关系无法用图 3 所示的等值线图表示出来,但从不同时刻的位移增量图(图4)可以看出,位移增量随荷载的增加而增加。在  $V_s$ 、 $V_p$  速度存在变化的位置,速度在纵向上减少,位移增量则增加。在 9.0 m 深度位置,由于速度存在断点,相应的位移增量则发生跳跃。但水平方向上的速度变化并非在任一时刻都能够被表

示出来,而只有当荷载足够大时才可以显现(如图 4(4)和图 4(5)),位移增量增加,则速度减小,反之亦然。

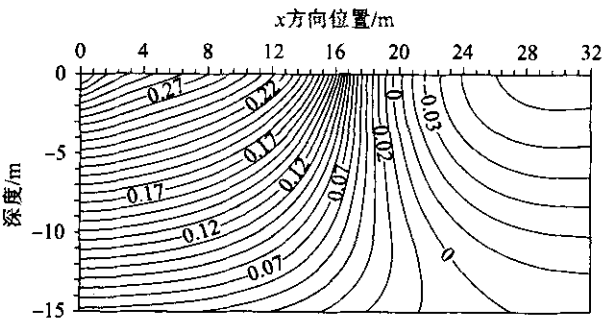
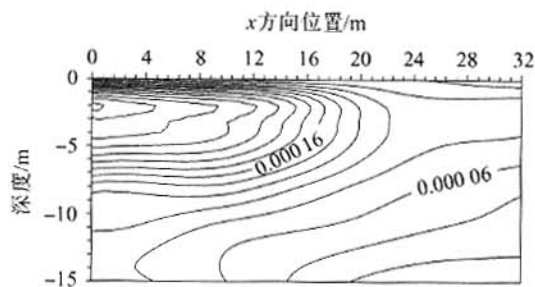
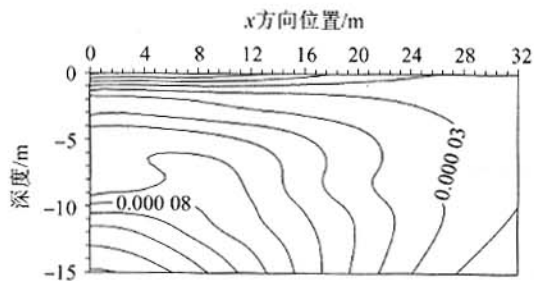


图 3 模型最终沉降量等值线

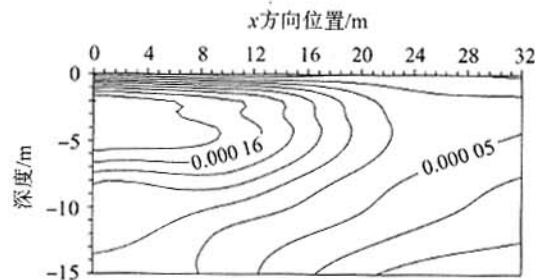
在加载状态下的表面沉降量慢慢地增加,其变化规律与加载过程同步(图5)。表面处沉降量并非一直随着时间的增加而减小,当荷载增加到 1/2 时,沉降量增加到最大值后开始减小。图6 所示的3 段位移轨迹与 3 个加载阶段一致。



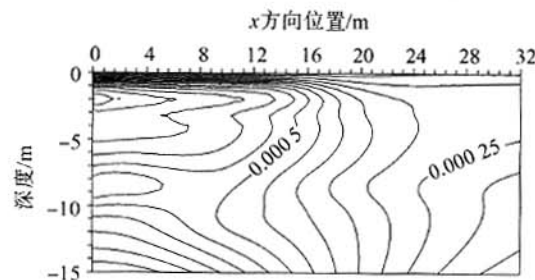
(1) 8 d



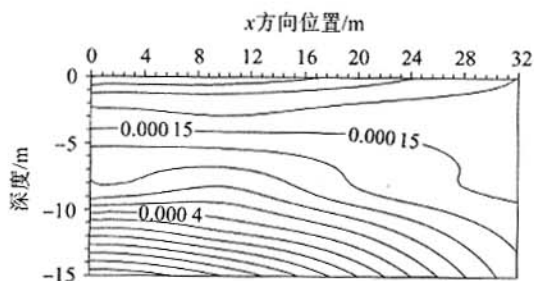
(2) 10 d



(3) 20 d



(4) 60 d



(5) 150 d

图 4 不同时刻 y 方向位移增量

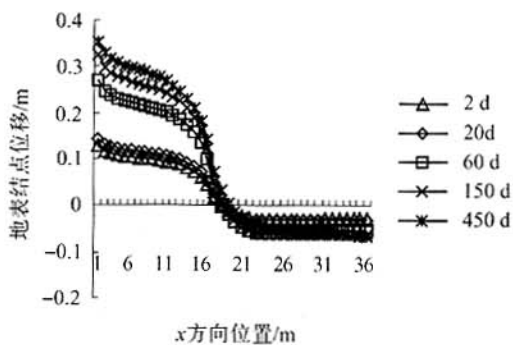


图 5 不同时间的表面沉降

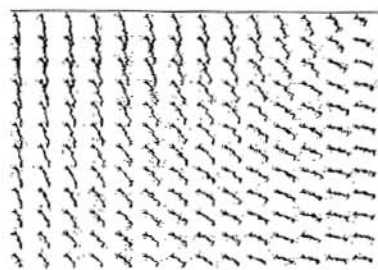


图 6 结点位移轨迹

#### 4 应用与分析

在某高速公路上,对路基做了映像地震和瞬态瑞雷波勘测,图7和图8为该试验段部分地震映像和瑞雷波解译剖面图。

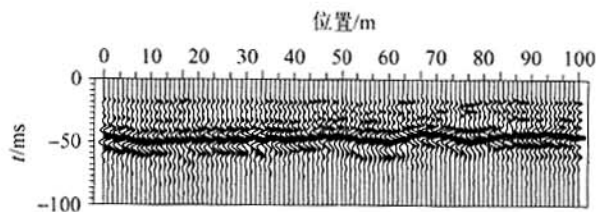


图 7 天然地基地震映像原始数据剖面

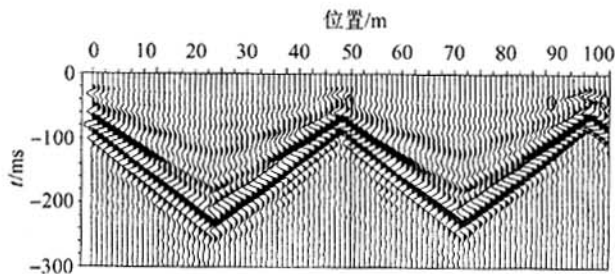


图 8 天然地基瞬态瑞雷波原始数据剖面

采用刘江平博士<sup>[3]</sup>的解译方法,由映像数据和瑞雷波数据分别获得了P波速度和S波速度,并进而

计算出每一勘测点位置的  $E_s$  和  $\mu$ 。以构建的数学模型为基础,在该高速公路上计算了 4 个断面位置的沉降量(图 9 显示了加载过程,计算总时间为 450 d)。

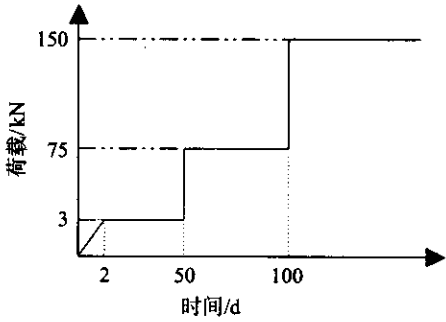


图 9 连续加载曲线

图 10 中显示的沉降等值线不像在图 4 中显示的那样光滑,这是因为在每个方向上其速度的变化均比较剧烈。加载初期,由速度变化引起的沉降增量变化很剧烈,如图 11 所示。随着时间的增加,路基被压实,速度变化趋于一致,相应沉降增量等值线也变得越来越平滑。

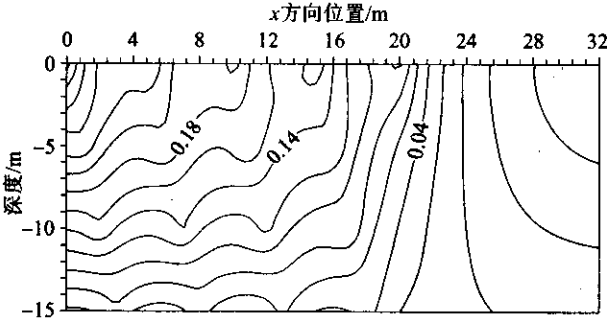


图 10 K52+240 最终沉降等值线

5 结论与建议

- (1)路基  $V_s$ 、 $V_p$  速度与沉降变化可以由不同时间沉降增量等值线图表示,如果  $V_s$ 、 $V_p$  速度变化足够大,还可以用沉降量等值线表示。
- (2)路基沉降增量变化趋势总是与  $V_s$ 、 $V_p$  速度增量相反,特别是荷载较小时其变化不明显。
- (3)当路基  $V_s$ 、 $V_p$  速度变化时,纵向沉降变化较横向变化剧烈,在沉降增量等值线上  $V_s$ 、 $V_p$  速度变化存在断点。
- (4)随着时间的增加路基被逐渐压实, $V_s$ 、 $V_p$  速度趋于一致,沉降增量曲线也变得越来越缓和,可见路基沉降量检测与分析中,综合地震勘探技术也是一种有效的方法。

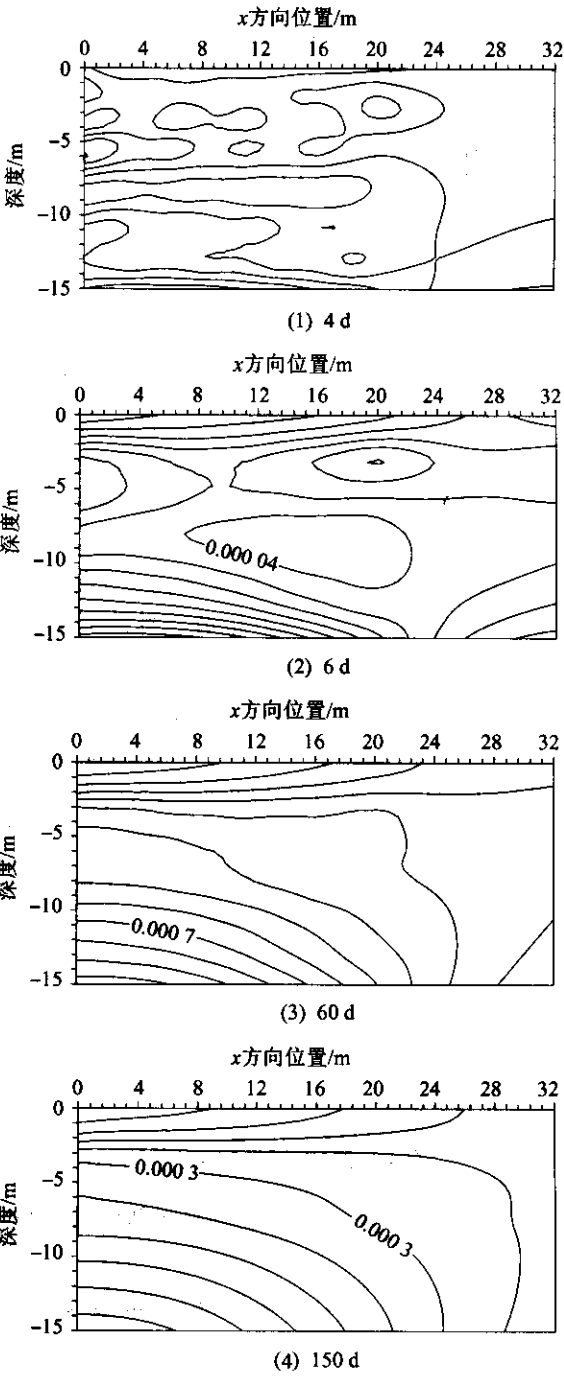


图 11 不同时间沉降增量示意

参考文献:

- [1] Biot A. General Theory of Three-dimensional Consolidation[J]. Applied Physics, 1941, 12.
- [2] 侯卫生, 刘江平. 工程地震勘探新进展[A]. 勘探地球物理进展[C]. 2002.
- [3] 刘江平, 侯卫生, 许顺芳. 相邻道瑞雷波法及在防渗墙强度检测中的应用[J]. 人民长江, 2003, 34(2).
- [4] Sandhu R S, Wilson E L. Finite Element Analysis of seepage in Elastic Media[J]. Journal of Engineering Mechanic Division, ASCE, 1969, 95.

文章编号: 0451-0712(2005)11-0098-04

中图分类号: U416.1:TP311.13

文献标识码: A

# 祥临公路滑坡及高边坡数据库系统的设计与实现

夏元友<sup>1</sup>, 张莉蔓<sup>1</sup>, 孙习民<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院 武汉市 430070; 2. 云南省祥临公路建设指挥部 弥渡县 675600)

**摘 要:** 介绍了云南省祥临公路滑坡及高边坡数据库系统的数据处理规则,并借助该系统以数据库的形式组织在工程中记录的各种数据,高效快捷地管理边坡及滑坡的各项信息。在分析了系统的标准化工作、功能需求后,详细介绍了系统的设计实现方法和主要技术。

**关键词:** VB; ActiveX; ADO; SQL Server; 数据库; 滑坡; 高切坡

在云南省祥临公路全线范围内,边坡与滑坡众多,采用传统的方法对所有边坡各种数据和资料进行管理十分不便。在边坡统计分析、边坡失稳机制与边坡稳定性判别中要涉及大量的边坡样本及其参数,需要边坡数据库及其管理系统的支持。借助计算机和网络,利用已有的技术和条件,通过数据库管理系统来提升数据处理水平、规范边坡数据采集、提高工作效率是一个具有现实意义的重要课题。基于充分利用原有设备资源的考虑,结合祥临公路边坡数据的积累情况,本文分析了祥临公路数据库管理的

业务流程,探讨了基于C/S(客户端/服务器)模式的云南省祥临公路滑坡及高边坡数据库系统的设计与实现方法。

## 1 系统分析

对系统的标准化工作、功能需求进行全面分析,是实现设计系统、评审系统功能性与可用性的基础,也是选择技术方案的重要依据。

### 1.1 标准化工作

由于滑坡和高边坡数量众多,数据有多种数据

基金项目: 云南省交通建设科技项目(云交科教[2002]113号文,[2004]967号文)  
收稿日期: 2005-10-10

# Research on Method Forecasting Subgrade Settlement Quantity by Seismic Techniques

LI Xiu-zhong<sup>1</sup>, RUI Yong-qin<sup>2</sup>, LU Cheng-ming<sup>1</sup>

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** It is a common method to resolve concretion equation of Biot law by using Finite Element Method (FEM) for calculating subgrade settlement, but the method is restricted in application due to long time consumed and high cost for getting elastic parameters by triaxial test. According to the density, velocity and elastic parameters of the roadbed soil, such as the relation between elastic modulus  $E_s$  and Poisson's ratio  $\mu$ , this paper introduces velocity and density into rigid matrix to solve concretion equation of Biot law and discusses integrative seismic method in settlement calculation of roadbed soil. The simulation analysis and actual application result show that seismic techniques are an effective method in examination and forecast of roadbed settlement.

**Key words:** subgrade engineering; seismic techniques; roadbed settlement; examination and forecast