

文章编号: 1000-7598-(2003) 01-0130-05

多元线性回归分析法计算顶管 施工引起的地面沉降

罗筱波, 周 健

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海, 200092)

摘 要: 采用多元线性回归分析法建立了一个地面沉降和其产生的主要因素之间的回归模型, 并利用 VC 编程实现了这个回归模型。程序运行中与实测数据紧密结合动态更新回归模型, 预测的沉降结果与实测数据吻合。

关 键 词: 顶管; 多元线性回归分析; 地面沉降; VC 编程

中图分类号: TU 431 **文献标识码:** A

Computation of ground settlement induced by the pipe jacking using multivariate linear regression method

LUO Xiao-bo, ZHOU Jian

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the theory of multivariate linear regression, a module about the relationship between ground settlement and its major factors is developed. This module is realized by using VC programming language. Compared with the data from field observations, the prediction of ground settlement using this module is satisfied.

Key words: pipe jacking; multivariate linear regression analysis; VC programming language

1 前 言

顶管施工是隧道或地下管道穿越道路、铁路、河流、建筑物等障碍时的一种暗挖施工方法,在市政隧道施工中被广泛采用。但顶管施工引起的地面沉降的计算在理论上是很难的。同时,在对顶管施工引起的地面沉降的理解也存在一些不同观点。文献[1]认为对于粘性土,可近似地认为所有的土层损失均表现为地面沉降;文献[2]认为土体的运动既有竖向分量(沉降或隆起),也有水平分量,其中水平分量包括土体沿顶管轴线方向的运动,工具管附近土体的运动表现为非线性的二维特征。对于顶管施工

引起的地面沉降的计算可用的计算方法目前还很少。国内有方从启,孙钧提出的利用半解析单元法将顶管施工中三维土运动问题转化成一维数值计算的计算方法^[2]。国外有 Dr.David N.Chapman 的“graphical method”^[3]用来预测顶管施工引起的地面运动。本文在理论分析引起顶管施工引起的地面沉降的影响因素的基础上结合工程实际,应用数理统计的方法建立多元回归模型对地面沉降进行计算和预测,并开发了顶管施工辅助控制系统软件。

2 元线性回归分析的基本理论

2.1 多元线性回归模型

多变量回归模型的一般形式：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_p x_p + \varepsilon \quad (1)$$

式中 ε 为随机误差， $E(\varepsilon) = 0$ 。

有限样本模型为：

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i, i = 1, 2, \cdots, n \quad (2)$$

相应的回归方程为：

$$E(y_i | x_1 = x_{i1}, x_2 = x_{i2}, \cdots, x_p = x_{ip}) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_p x_{ip} \quad (3)$$

式中 $\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_n$ 称为总体回归参数。用矩阵形式可以表示为：

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix};$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}; \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

式中 Y 为观测值向量； β 为参数向量； X 为常数矩阵（是一个 $n \times (p+1)$ 维的数据表）； ε 为随机误差向量。

Y 的最小二乘估计量：

$$\hat{Y} = X(X'X)^{-1}X'Y \quad (5)$$

2.2 逐步回归法

逐步回归法是最常选用的变量筛选方法。它是向前选择变量法和向后删除变量法的一种结合。在向前选择变量法中，一旦某个自变量被选入模型，它就永远留在模型之中。然而，随着其它变量的引入，由于变量之间互相传递的相关关系，一些先进入模型的变量的解释作用可能会变得不再显著。对于向后删除变量法，一旦某个自变量被删除后，它就永远被排斥在模型之外，但是，随着其它变量的被删除，它对 y 的解释作用也可能会显著起来。所以，逐步回归法采取边进边退的方法。对于模型外部的变量，只要它还可提供显著的解释信息，就可以再次进入模型；而对于已在模型内部的变量，只要它的偏 F 检验不能通过，则还可能从模型中被删除。

3 程序实现

3.1 回归变量的选取和回归模型的建立

根据顶管工程的实际分析，文献[4] 根据顶管管道与土之间的应力测量认为，顶管顶力、管线偏差、施工停顿、润滑措施和开挖技术等各因素之间的关系是非常复杂的，对顶管沉降的影响较大。文献[5]认为，顶管施工的环境效应主要是土体的沉降，土体的水平运动较小。因此，可以认为，顶管施工中引起地面沉降的主要因素有：轴线偏位、高程偏位和纠偏、机头推力、距工作井距离、距轴线距离，即可以建立如下的地面沉降与各要素的函数关系式：

$$S = F(\Delta l, \Delta v, l, v, x, y, f) \quad (6)$$

公式(6)的精确解析式是难以得到的，因此，本文依据工程经验和理论分析对公式(6)建立一个回归模型。在回归模型中，为了提高精度，还对公式(6)中的自变量取了它们之间的二次项共 35 个自变量。即：

$$S = F(\Delta l, \Delta v, l, v, x, y, f, \Delta l \times \Delta l, \Delta l \times \Delta v, \Delta l \times l, \Delta l \times v, \Delta l \times x, \Delta l \times y, \Delta l \times f, \Delta v \times \Delta v, \Delta v \times l, \Delta v \times v, \Delta v \times x, \Delta v \times y, \Delta v \times f, l \times l, l \times v, l \times x, l \times y, l \times f, v \times v, v \times y, v \times f, x \times x, x \times y, x \times f, y \times y, y \times f, f \times f) =$$

$$k_0 + k_1 \Delta l + k_2 \Delta v + k_3 l + k_4 x + k_5 y + k_6 f +$$

$$k_7 \Delta l^2 + k_8 \Delta l \times \Delta v + k_9 \Delta l \times l +$$

$$k_{10} \Delta l \times v + k_{11} \Delta l \times x + k_{12} \Delta l \times y +$$

$$k_{13} \Delta l \times f + k_{14} \Delta v^2 + k_{15} \Delta v \times l +$$

$$k_{16} \Delta v \times v + k_{17} \Delta v \times x + k_{18} \Delta v \times y +$$

$$k_{19} \Delta v \times f + k_{20} l^2 + k_{21} l \times v + k_{22} l \times x +$$

$$k_{23} l \times y + k_{24} l \times f + k_{25} v^2 + k_{26} v \times y +$$

$$k_{27} v \times f + k_{28} x^2 + k_{29} x \times y + k_{30} x \times y +$$

$$k_{31} x \times f + k_{32} y^2 + k_{33} y \times f + k_{34} f^2 \quad (7)$$

式中 S 为量测点的最终沉降值； y 为量测点距工作井的轴线距离； x 为量测点距顶管的横向距离； f 为机头在距离为 y 处的推力值； v 为机头在距离为 y 处的垂直向偏差； l 为机头在距离为 y 处的水平向偏差； Δv 为机头在距离为 y 处的垂直向纠偏； Δl 为机头在距离为 y 处的水平向纠偏， $k_0, k_1, \dots, k_{34}$ 是回归公式的系数。

3.2 程序实现

开发的顶管施工辅助控制系统软件采用 VC 开

发, 顶管施工实测的各种数据存放在一个 Access 数据库中, 用逐步回归算法建立回归模型。回归模型随着施工过程中采集到的实测数据的更新而不断更新以使模型更加符合工程实际。程序还实现了自动预警功能, 当输入数据库的实测数据或用回归模型预测的沉降值超出了设定的控制值时便发出预警信号, 提示施工人员采取措施。为了提供更加友好的用户界面, 程序还实现了计算的可视化, 用户既可¹³² 询任意点的沉降也可以生成地面沉降的三维模拟图。程序的基本流程图如下:

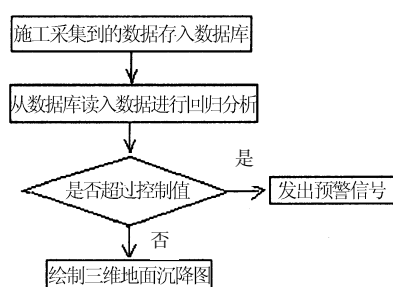


图 1 程序流程图

Fig. 1 program's flow chart

4 工程应用分析

浦东三林港顶管工程采用双管先后顶进的方法, 顶进距离为 250 m。对浦东三林港顶管工程实测数据进行回归分析得到的回归方程为:

$$S = 1.35259f + 0.0037175xy - 0.0514151xf + 0.0246204y\Delta v - 0.00479091yf - 1.8443\Delta v^2 - 0.46821 \quad (8)$$

回归方程的标准偏差为: 1.95281

图 2~4 是在公式(8)中取定 $\Delta v, x, y, f$ 中 3 个变量的值时余下的一个变量与沉降的关系图。从这个方程和关系图可以看到:

(1) 最终沉降 S 受顶进距离 y 的影响最大, 原因是 y 相应于土体受到扰动的时间长短有关, y 值大的土体受到的扰动时间长, y 值小的土体受到的扰动时间短, 这表明最终沉降 S 中固结沉降占了很大比重, 因而与扰动的影响因素关系最大。

(2) 最终沉降 S 还受轴线纠偏的影响, 而轴线纠偏会引起土体的超挖和欠挖, 从而产生土层损失, 说明土层损失对最终沉降 S 有比较大的影响。

(3) 最终沉降 S 受机头在距离为 y 处的推力值的影响也很大。机头在距离为 y 处的推力值的大小也反应了土体受扰动的大小, 机头在距离为 y 处的推力值越大, 则对土体的扰动也就越大, 最终沉降 S 也就越大。

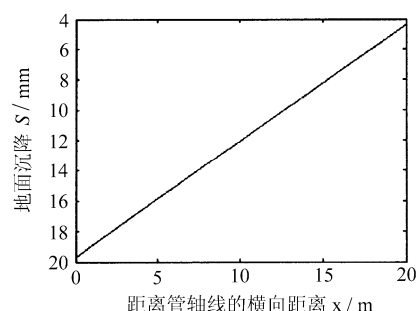

 图 2 x 与 S 关系图

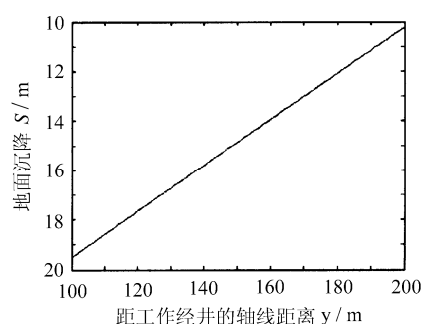
 Fig. 2 Relation between x and S

 图 3 y 与 S 关系图

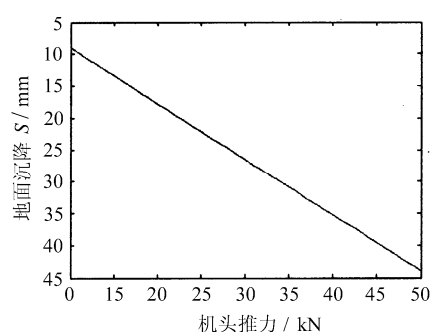
 Fig. 3 Relation between y and S

 图 4 f 与 S 关系图

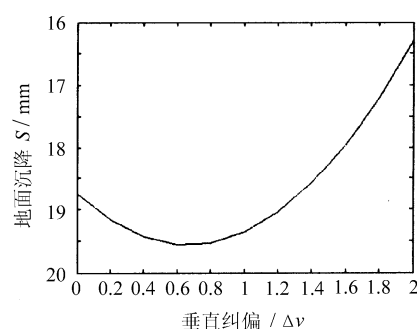
 Fig. 4 Relation between f and S

 图 5 Δv 与 S 关系图

 Fig. 5 Relation between Δv and S

表 1 是用回归模型得到的回归公式对其中一些测点的最大地面沉降预测值和实测沉降值的对比。表中的各符号含义与模型中的含义相同。从表中可以看到，在预测沉降值时用实测得到的施工参数作为输入参数得到的预测值与实测值的差别不是很大。对顶管工程所引起的地面沉降来说，这个预测精度是足够的。

表 1 实测沉降值与预测沉降值比较

Table 1 Comparison of the field settlement measurements and settlement prediction

测点号	x / m	y / m	f / kN	Δv / cm	Δl / cm	v / cm	l / cm	S / mm	S 预测值 / mm	误差 / %
Sc14	15	105	230	1.5	0.5	10	0	5.32	6.92	23.1
Sc15	9	105	230	1.5	0.5	10	0	11.16	11.67	4.4
Sc41	15	147	250	2	1.5	11	3	4.11	4.52	9.1
Sc45	9	147	250	2	1.5	11	3	8.96	8.95	0.1

离为 y 处的推力值 $f=280$ kN，机头在距离为 y 处的垂直向偏差 $v=12$ cm，机头在距离为 y 处的水平向偏差 $l=3$ cm，机头在距离为 y 处的垂直向纠偏 $\Delta v=2$ cm，机头在距离为 y 处的水平向纠偏 $\Delta l=1$ cm。

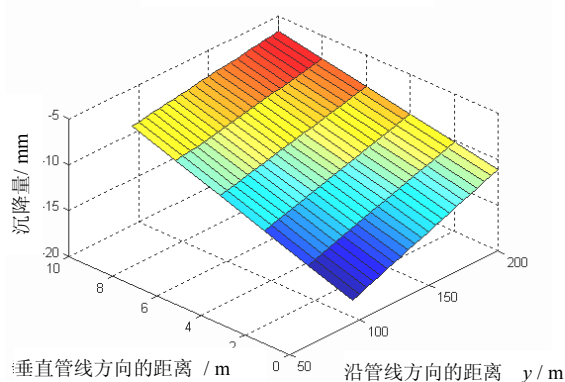


图 6 地面可能最大沉降模拟图

Fig. 6 The maximum ground settlement's 3D view

从图 6 中我们可以很直观地看到：

(1) 在与管线平行的方向上，地面的最终沉降 S 受顶进距离 y 的影响很大，从工作井到接收井，地面沉降 S 由大到小的分布规律非常明显。原因是 y 对应于土体受到扰动的长短有关， y 值大的土体受到的扰动时间长， y 值小的土体受到的扰动时间短。

(2) 在垂直管线方向上，地面的最终沉降 S 受点的垂直管线方向的距离 x 的影响很大，从管线轴心向外，地面沉降 S 由大到小的分布规律非常明显。原因是 x 相应于土体受到扰动的影响大小， x 值

在顶管施工辅助控制系统软件中，为了更好地应用回归模型进行地面沉降的计算和施工，利用 Matlab 图形库实现了计算可视化。图 6 是对地面沉降最大可能值（即计算中各种参数都取其最大可能值）预测的 3D 模拟图。其中取的参数：机头在距

小的土体受到的扰动影响大， x 值大的土体受到的扰动影响小。

图 7 是由各测点实测沉降值经过 shepard 局部插值法曲面拟合算法^[6]插值后生成的 3D 模拟图。通过对比图 6 和图 7 我们可以发现：图 6 和图 7 所显现的地面沉降的规律是相同的，也即证明本论文所用的回归模型是可行的。但是在沉降值方面，由于图 6 在沿管线的方向用的参数都是相同的，而且，预测的是地面沉降的最大值，因而，其沉降值要比由沉降实测值所生成的图 7 来的大，同一断面上的沉降值变化也更加大，且沉降的变化曲线也不存在起伏，呈单调变化。

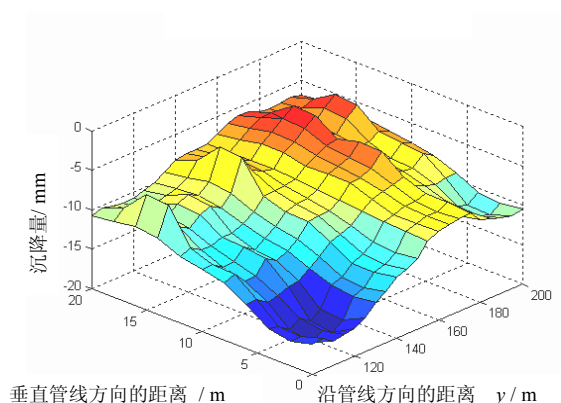


图 7 测点沉降 Shepard 插值模拟图

Fig. 7 The field settlement's 3D view

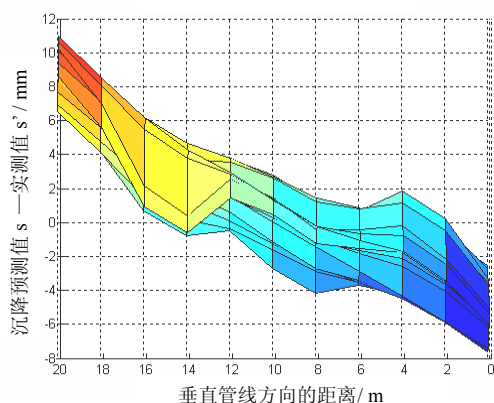


图 8 预测值与实测值的误差

Fig. 8 The difference between field settlement and predicted settlement

图 8 是预测的最大沉降值与实测值之差在垂直管线方向的投影图。从图 8 可以看到, 曲线的宽度在 3 ~ 6 mm 之间, 表明预测的最大可能沉降值与实测值的最大误差不超过 3 ~ 6 mm。从图中还可以看出, 在垂直管线方向上, 从管线轴心向外, 预测的最大沉降值与实测值之间的大小变化关系, 是由管线轴心附近预测的最大沉降值大于实测值, 变为预测的最大沉降值小于实测值。这对实际工程中用此回归模型来进行地面沉降控制很有意义。

5 结 语

通过实测值和回归公式的预测对比分析证明, 回归公式的基本模型是可以在工程上使用的, 而且, 预测的沉降的规律性与实测和理论分析的规律能够较好的吻合。但是, 用回归模型进行预测的精度目

前还不够高, 一方面是理论分析还不够透彻, 提出的回归模型还不完善; 另一方面是目前可用的实测资料还比较少。相信随着实测资料的不断积累, 回归模型的精度也会不断提高。

参 考 文 献

- [1] Atteuall P B. An overview of site instigation and long-term tunneling-induced settlement in soil[A]: Engineering Geology of Underground Movement, Geological Society Engineering Geology Special Publication[C]. Nottingham: Geological Society. 1987,(5): 55 - 61.
- [2] 方从启, 孙钧, 王承德. 基于半解析元法研究顶管施工引起的地层运动[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 1998.
- [3] Dr David N. Chapman. A graphical method for predicting ground movements from pipe jacking[J]. *Proceedings of the institution of civil engineering, Geotechnical Engineering*, 1999, 137(02): 87 - 96.
- [4] Mark Andrew Marshall. Pipe-Jacked Tunneling: Jacking Loads and Ground Movements[D]. British: Magdalen College, Oxford University. 1998.
- [5] 乔宏伟. 顶管施工中的环境效应分析[硕士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2001.
- [6] 来新民, 黄田, 曾子平, 林忠钦. 基于 NURBS 的散乱数据点自由曲面重构[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 1999, 11(5): 433 - 436.

SINOROCK-2004 国际岩石力学研讨会 ——岩石特征、模拟与岩石工程设计方法 第一号通知(摘要)

SINOROCK-2004 国际岩石力学研讨会将于 2004 年 5 月 18~21 日在中国三峡工程工地召开, 在时间上与 2004 年 5 月 22~27 日在新加坡召开的世界隧道大会相衔接。这次研讨会由中国科学院和《国际岩石力学与采矿科学杂志》主办。会议组委会主席为中国科学院武汉岩土力学研究所主持工作的冯夏庭副所长和《国际岩石力学与采矿科学杂志》主编、英国帝国学院 J. A. Hudson 教授。

这次研讨会的主题是“岩石特征、模拟与岩石工程设计方法”。欢迎提交有关课题的论文, 包括工程实录文章。会议邀请国内外知名学者作主题报告, 并就“集成设计方法”的前沿课题进行专题讨论。

这次研讨会的工作语言是英语, 而提交会议的论文可以英文或中文撰写。但以中文撰写的论文必需有 1 整页的英文摘要和英文图表名。被大会录用的论文分别以《国际岩石力学与采矿科学杂志》(英文)和《中国岩石力学与工程学报》(中文)的专集形式出版。这两份专集都同时发给会议代表。

提交论文的重要截止日期为：

2003 年 6 月 30 日提交论文摘要 ;2003 年 7 月评阅论文摘要 ;2003 年 8 月 1 日寄出论文书写指南 ;2003 年 10 月 31 日提交论文 ;2003 年 11 月评阅论文 ;2003 年 11 月 30 日通知作者评阅意见 ;2003 年 12 月 31 日论文寄送编辑部。

2003 年 6 月 30 日前提交供评阅的论文摘要应清晰说明论文的主要内容，摘要限于 400 字以内，应含文题、作者姓名、单位、联系电话、传真号、e-mail 地址。

拟用英文撰写的论文的摘要请通过 sinorock@rockeng.co.uk 传往 Prof J. A. Hudson ; 拟用中文撰写的论文的中、英文摘要请通过 sinorock@deli.whrsm.ac.cn 传往冯夏庭教授。

2003 年第一期《岩石力学与工程学报》上刊发的消息“第一届岩石工程设计方法国际研讨会 (REDM2004)2004 年在三峡工程工地召开”与本通知不同之处，一律以本通知为准。

有关本次会议的最新信息请随时阅览网址：<http://www.sinorock2004.com.cn>。