

深基坑开挖地表移动变形分析的 Fuzzy 模型

李文秀, 赵胜涛, 梁旭黎, 王 晶

(河北大学 岩土工程研究所, 河北 保定 071002)

摘要: 采用模糊数学中的模糊测度理论导出了深基坑开挖引起的周围地表移动变形问题分析的数学模型, 并用该模型对深基坑开挖引起的周围地表移动变形工程实例进行了具体的计算分析。将理论分析结果与现场实测资料比较, 二者吻合得较好。这一结果表明, 导出的模糊测度理论模型适用于预测分析城区深基坑开挖引起周围地表移动变形问题。

关键词: 岩土力学; 深基坑; 地表移动变形; 模糊测度

中图分类号: TU 432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 6915(2005)增 2 - 5495 - 04

FUZZY MODEL FOR ANALYSIS OF GROUND MOVEMENT AND DEFORMATION DUE TO DEEP EXCAVATION

LI Wen-xiu, ZHAO Sheng-tao, LIANG Xu-li, WANG Jing

(*Institute of Geotechnical Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China*)

Abstract: Based on the results of the statistical analysis of a large amount of measured data in excavation, a fundamental theoretical model of ground surface movement due to deep excavation is established by using the fuzzy measures theory of fuzzy mathematics. The formulae of ground surface displacement and deformation are developed and applied to the prediction of the ground surface movement due to deep excavation. The agreement of the theoretical results with the field measurements shows that the model is satisfactory and the formulae obtained are valid and thus can be effectively used for predicting the ground movement due to deep excavation in the city.

Key words: rock and soil mechanics; deep excavation; ground displacement and deformation; fuzzy measures

1 引 言

在岩土工程和土木工程建设过程中, 深基坑开挖引起的周围地表移动变形问题越来越受到人们的重视。由于地表移动变形造成邻近建筑物及地下管道和电缆的影响以及给工程设施带来的损失是很大的。许多国家在城区为保护邻近建筑物和地下管线等设施的安全, 对基坑周围地表的移动有严格限制。因此, 对深基坑开挖引起的周围地表移动变形大小

进行预测具有重要的工程实际意义。

关于工程开挖地表移动、基坑周围地表下沉计算及对土钉墙位移监测等实际问题, 许多专家学者作过大量的研究^[1~16]。在前人工作的基础上, 本文根据基坑周围地表的移动工程实际, 采用模糊数学理论进行分析, 以寻求一种简便、实用的分析方法。

2 地表移动分析的 Fuzzy 测度模型

如图 1 所示, 在基坑开挖后, 挡土墙一侧地表

收稿日期: 2005 - 06 - 26; **修回日期:** 2005 - 07 - 01

基金项目: 河北省教育厅科研项目(2004308); 河北大学人才引进项目(2001Y01)

作者简介: 李文秀(1954 -), 男, 1989 年于中南工业大学采矿工程专业获硕士学位, 现任教授, 主要从事岩土力学及岩土工程等方面的教学与研究。E-mail: leewenxiu@yahoo.com.cn.

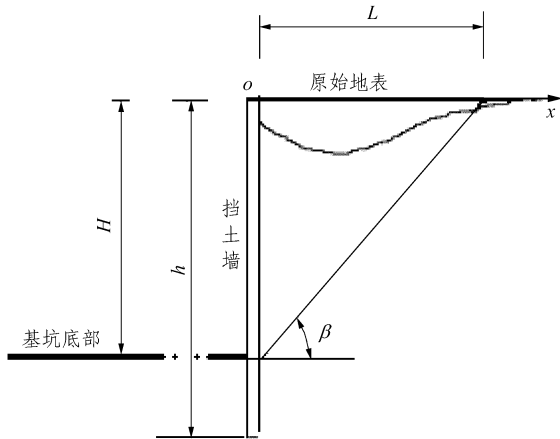


图1 基坑开挖引起的地表移动变形

Fig.1 Ground subsidence due to deep excavation

必将产生移动变形。经过大量现场实测和统计分析，有支撑挡土墙侧向位移曲线可用非线性曲线进行拟合。为建立理论模型，先给出相关的模糊数学理论定义。

定义 假设 A 是一个由某些样本所构成的集合(模糊子集合)，集合 A 就称为模糊事件，且有 $A \in D$ ；则模糊事件的概率测度简称为“模糊测度”(fuzzy measures)，并用下式^[4, 9, 15]表示：

$$M(A) = \int_{\Omega} \mu_A(x) dp(x) \quad (1)$$

$$M(A) = \int_{\Omega} dp(x) \equiv 1.0 \quad (2)$$

式中： $\mu_A(x)$ 为 Borel 可侧的函数， $\mu_A(x) : \Omega \rightarrow [0, 1]$ 为隶属函数(membership function)； $dp(x)$ 为分布密度函数。

现将基坑开挖引起的地表移动变形示于图1。

地下基坑开挖之后，必将对基坑周围地表产生不同程度的影响。图1中所示的 H 为开挖深度， h 为挡土墙高度， β 为主要影响范围角， L 为主要影响宽度。

实测资料表明，开挖引起地表移动变形，地表某点发生下沉、变形现象可视为一种随机的、具有一定模糊性的非确定性现象，据此即可利用模糊数学方法建立相应的数学模型^[4, 9, 15]。

开挖后地表下沉的计算公式：

$$W(x, y, z) = kM(A_1)M(A_2) \quad (3)$$

式中： k 为下沉系数，为待定常数； $M(A_1)$ ， $M(A_2)$ 为模糊测度，且有

$$M(A_1) = \int_{D_1} f_{A_1}(x) dp(x) \quad (4)$$

$$M(A_2) = \int_{D_2} f_{A_2}(y) dp(y) \quad (5)$$

根据研究，基坑开挖产生的地表沉降通常在距坑边一定距离处达到最大下沉值。

根据大量的地表移动实测资料统计分析结果，地表岩土体各下沉点 x 属于“地表下沉点集合 A_1 ” (A_1 为模糊集合)的隶属函数具有下面形式：

$$f_{A_1}(x) = \exp[-c(x - \xi)^2] \quad (6)$$

式中： c 为待定参数。

而地表下沉点的分布密度满足函数：

$$dp(x) = \frac{1}{L} \exp\left[-\frac{\pi}{2L^2}(x - \xi)^2\right] \quad (7)$$

地表沉降范围 L (见图1)可用下式表示：

$$L = H / \tan \beta \quad (8)$$

式中： H 为基坑开挖深度， β 为主要影响范围角。

根据定义有如下模糊测度：

$$M(A_1) = \int_{D_1} \frac{1}{L} \exp\left[-\frac{\pi}{L^2}(x - \xi)^2\right] d\xi \quad (9)$$

式中： $D_1 \in [0, L]$ ， L 为 x 方向的影响范围宽度。

式(9)为水平地面 x 方向最终稳定下沉模糊测度表达式。

同样可获得 y 方向最终稳定的下沉模糊测度表达式：

$$M(A_2) = \int_{D_2} \frac{1}{L_1} \exp\left[-\frac{\pi}{L_1^2}(y - \eta)^2\right] d\eta \quad (10)$$

式中： $D_2 \in [0, L_1]$ ， L_1 为 y 方向的影响范围宽度。

将式(9)，(10)代入式(3)，确定出下沉系数 k ，即得最终稳定下沉表达式。

当基坑开挖并形成以后，基坑周围一定范围内土体不仅在垂直方向上产生移动(即下沉)和变形，而且在水平方向将会产生移动和变形。

x 方向水平移动公式：

$$U_x(x, y, z) = B \frac{\partial}{\partial x} W(x, y, z) \quad (11)$$

式中： $B = bH$ ， $b = 0.20 \sim 0.40$ 。

x 方向水平变形公式：

$$E_x(x, y, z) = \frac{\partial}{\partial x} U(x, y, z) \quad (12)$$

关于倾斜等变形指标均可由以上的公式导出。

3 工程实例预测分析

本文所研究的我国上海市区大楼基坑，开挖深

度 H 为 8.6 m, 周边设置了挡土墙, 挡土墙高度 h 为 15 m. 工程技术人员对挡土墙一侧地表进行了实地观测, 获得了部分地表下沉实测资料. 根据地表下沉实测资料, 确定出了相应的参数值(见表 1).

表 1 工程参数值

Table 1 Engineering parameters

H / m	L / m	$\beta / (^{\circ})$	b	k	W_{\max} / mm
8.6	9.0	65	0.2	0.26	260.0

按表 1 参数进行分析(计算过程中, 取地表最大下沉点为坐标原点), 所获地表垂直位移结果见图 2, 水平移动和变形预测结果见图 3, 4.

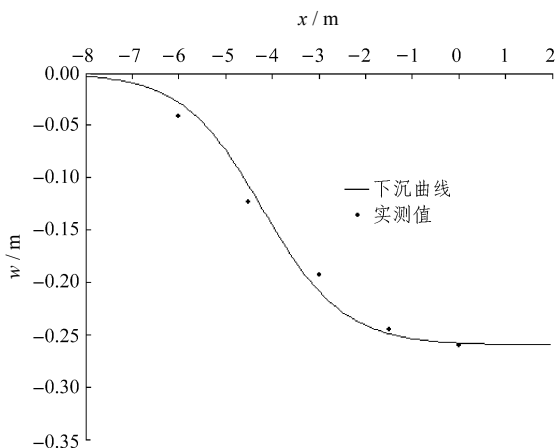


图 2 地表下沉理论预计结果与实测资料对比图
Fig.2 Comparison between the measured data and the theoretical prediction of ground surface subsidence

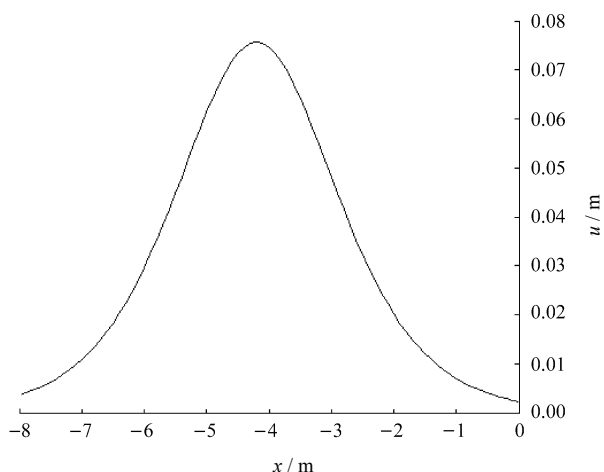


图 3 地表水平移动理论预计结果
Fig.3 Theoretical curve of horizontal displacement

由图 2 可知, 理论结果与实测值吻合的较好. 由图 3, 4 可知, 基坑开挖后, 地表最大水平移动将

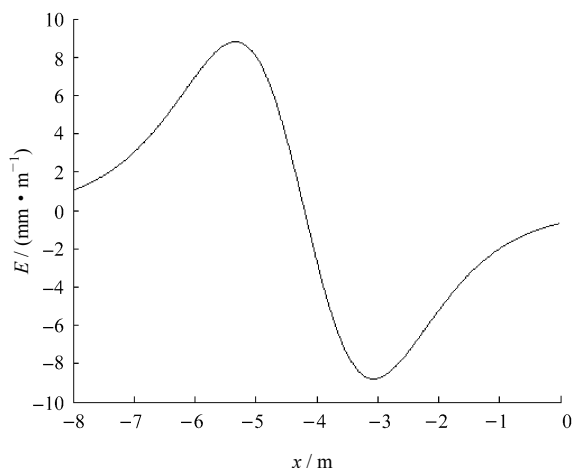


图 4 地表水平变形理论预计结果
Fig.4 Theoretical curve of horizontal deformation

超过 70 mm; 而最大水平拉伸变形将超过 8 mm/m, 因而在基坑一侧地表将会出现裂缝等现象. 工程实际情况证实了这一点. 但由于挡土墙的作用, 而使地表裂缝没有进一步发展. 这一点也充分证实了对深基坑而言, 采用挡土墙一类的安全技术措施是必要的.

4 结 论

(1) 在深基坑开挖中周围地表沉降可采用模糊数学中的模糊测度理论计算. 本文提出的模糊测度预测方法所获结果满足工程精度要求.

(2) 根据本文所导出的公式, 不仅可计算分析地表下沉, 还可以预测分析水平移动、倾斜及水平变形等指标. 依此可预测分析变形量的大小, 为有效地保护地表建筑物及地下管线等设施的安全并为采取相应的工程技术措施提供科学依据.

参考文献(References):

[1] 于怀昌, 刘汉东, 丁仁伟. 深基坑降水过程中周围建筑物沉降的系统预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3 905 - 3 909. (Yu Huaichang, Liu Handong, Ding Renwei. Forecasting building settlement around dewatering deep foundation pit by grey system theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3 905 - 3 909.(in Chinese))

[2] 美国联邦公路总局. 土钉墙设计施工与监测手册[M]. 余诗刚译. 北京: 中国科学技术出版社, 2000.(FHWA. Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls[M]. Translated by She Shigang. Beijing: China Science and Technology Press, 2000.(in

- Chinese))
- [3] Nicieza C G, Alvarez M I, Menendez A, et al. The new three-dimensional subsidence influence function denoted by $n - k - g$ [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(3): 372 - 387.
- [4] 李文秀. Fuzzy数学理论在采矿及岩土工程中的应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.(Li Wenxiu. *Applications of Fuzzy Mathematics in Mining and Geotechnical Engineering*[M]. Beijing: China Metallurgy Industry Press, 1998.(in Chinese))
- [5] Aksoy C O, Kose H, Onargan T, et al. Estimation of limit angle using laminated displacement discontinuity analysis in the Soma coal field, Western Turkey[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(4): 547 - 556.
- [6] 何世秀, 胡其志, 庄心善. 渗流对基坑周边沉降的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1 551 - 1 554.(He Shixiu, Hu Qizhi, Zhuang Xinshan. Influence of seepage on ground settlement of deep foundation pit[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1 551 - 1 554.(in Chinese))
- [7] 李文秀, 梅松华. BP神经网络在岩体移动参数确定中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(增): 1 762 - 1 765.(Li Wenxiu, Mei Songhua. Application of BP neural networks into back analysis of rockmass movement parameters[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(Supp.): 1 762 - 1 765.(in Chinese))
- [8] 程龙飞, 袁宝远. 基于前馈神经网络的基坑测斜位移校正与变形预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(12): 2 038 - 2 041.(Cheng Longfei, Yuan Baoyuan. Displacement correction and deformation forecast of foundation pit with feed forward neural network[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(12): 2 038 - 2 041.(in Chinese))
- [9] 李文秀. 急倾斜厚大矿体地下与露天联合开采岩体移动分析的模糊数学模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(4): 572 - 577.(Li Wenxiu. Fuzzy mathematics models on rock mass displacements due to open-underground combined mining for thick ore body with steep dip angle[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(4): 572 - 577.(in Chinese))
- [10] Pula O, Pula W, Wolny A. On the variational solution of a limiting equilibrium problem involving an anchored wall[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(2): 107 - 121.
- [11] 李文秀, 梁旭黎, 赵胜涛. 地下水影响下裂隙岩质边坡变形 Fuzzy 测度分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(2): 302 - 306.(Li Wenxiu, Liang Xuli, Zhao Shengtao. Fuzzy measures analysis for displacements and deformations of jointed rock slope under influence of groundwater[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 302 - 306.(in Chinese))
- [12] 李文秀, 赵胜涛, 梁旭黎, 等. 小官庄矿地表下沉分析的模糊 - 遗传规划法[J]. *矿山压力与顶板管理*, 2005, 22(3): 89 - 91.(Li Wenxiu, Zhao Shengtao, Liang Xuli, et al. Fuzzy-genetic programming method of predicting surface subsidence due to underground mining in Xiaoguanzhuang mine[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 2005, 22(3): 89 - 91.(in Chinese))
- [13] Yavuz H. An estimation method for cover pressure re-establishment instance and pressure distribution in the goaf of longwall coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 193 - 205.
- [14] Deck O, Heib M A, Francoise Homand. Taking the soil-structure interaction into account in assessing the loading of a structure in a mining subsidence area[J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(4): 435 - 448.
- [15] 戴兰芳, 苏胜昔, 李文秀. 采空区地表建筑物基础稳定性的 Fuzzy 测度分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(11): 1 791 - 1 794.(Dai Lanfang, Su Shengxi, Li Wenxiu. Fuzzy measures analysis of stability of building foundations on mined-out areas[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(11): 1 791 - 1 794.(in Chinese))
- [16] 李文秀, 翟淑花, 乔金丽. 软岩采区地表移动对地面工业建筑物影响分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(11): 1 702 - 1 705.(Li Wenxiu, Zhai Shuhua, Qiao Jinli. Analysis of ground subsidence due to underground mining in soft rock mining areas and its influence on industrial buildings[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(11): 1 702 - 1 705.(in Chinese))