

文章编号:1671-8879(2011)01-0017-05

# 拓宽路基下软土地基工后沉降预测

翁效林<sup>1,2</sup>, 张留俊<sup>2</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;  
2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

**摘 要:** 拓宽路基荷载作用下的软土地基工后沉降是导致高速公路改扩建工程相关病害的主要原因之一。为了准确掌握软土地基的固结沉降状态及工后沉降值, 为差异沉降控制手段的设计和动态施工提供依据和指导, 建立了考虑蠕变的软土地基沉降模型; 基于高速公路改扩建工程现场沉降监测资料, 运用 3 层 BP 神经网络方法反演了计算模型的计算参数, 并在此基础上运用有限元软件对拓宽路基的工后沉降作出预测。研究表明, 实测沉降值与有限元计算沉降值的曲线基本吻合。

**关键词:** 道路工程; 道路拓宽; 软土地基; 沉降预测

**中图分类号:** U416.1 **文献标志码:** A

## Settlement prediction of soft subgrade under broaden embankment

WENG Xiao-lin<sup>1,2</sup>, ZHANG Liu-jun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co Ltd, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

**Abstract:** The settlement of the soft ground under embankment load after highway reconstruction is one of the main reasons that lead to related diseases of highway extension project. In order to accurately grasp the state of soft soil consolidation settlement and post-settlement value which can provide a basis and guidance to differential settlement control means for the design and dynamic construction, this paper established soft ground subsidence model which take into account creep, based on widened field settlement monitoring data by using three-layer BP neural network inverse model for calculating the material parameters, and on this basis, forecasted post-construction settlement of widening roadbed, compared with the actual monitoring results. The results show that the measured sedimentation value and the finite element method settlement value are basically consistent. 1 tab, 5 figs, 14 refs.

**Key words:** road engineering; broaden pavement; soft subgrade; settlement prediction

## 0 引 言

高速公路的拓宽工程有别于一般路堤的修建, 原因主要有两点: 一是由地基、固结基本完成路基、

新填筑路基、路面、处治构造物组成的复杂体系, 体系中的各组成部分相互耦合, 新老路堤的沉降变形难以用简单的理论计算去模拟; 二是考虑到拓宽路面结构层施工组织、进度的合理安排, 以及采取差异

收稿日期: 2010-04-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2009JC117)

作者简介: 翁效林(1980-), 男, 河南固始人, 长安大学讲师, 中交第一公路勘察设计院有限公司在站博士后,

E-mail: wengxiaolin2000@sohu.com。

沉降控制技术经济性和有效性,拓宽路基的工后沉降的准确预测远远高于对一般路堤的要求。因此,开展拓宽路基下软土地基沉降的准确计算及工后沉降的预测就变得很有必要<sup>[1-5]</sup>。在施工过程中,依据沉降观测资料开展变形参数反演,基于特定的沉降预测模型及其发展趋势来推测未来实体工程的工后沉降值,从而及时掌握软土地基的固结沉降状态,为差异沉降控制手段的设计和动态施工提供依据和指导,进而达到安全施工和优化设计的双重目的。目前,以量测信息为目标的反分析法,在岩土工程领域得到了极大的发展和广泛的应用<sup>[6-11]</sup>。本文在前人研究的基础上,根据高速公路改扩建工程软土地基路段的实际监测资料,运用3层BP神经网络分析法进行参数反演,根据指数曲线模型来预测多级填土荷载下软土地基的工后沉降趋势;预测结果对道路改扩建的设计理论和动态信息化设计施工起到借鉴作用。

## 1 参数反演理论

人工神经网络建模是人工智能研究中的一个分支,在复杂的非线性系统中具有较高的建模能力及对数据良好的拟合能力。神经网络具有自组织、自学习、非线性动态处理及容错性强等特征,具有联想推理和自适应识别能力,特别适合于处理各种非线性问题<sup>[12-13]</sup>。人工神经网络的模型有许多种,其中非线性变换组成的前馈网络(back propagation,简称BP神经网络)是目前应用最为广泛的网络模型。典型的BP神经网络是3层前馈神经网络,它包括输入层、隐含层和输出层,各层间隔实行权连接<sup>[14]</sup>。

图1为一个典型的3层BP神经网络模型。设输入模式向量 $\mathbf{A}_k$ 为

$$\mathbf{A}_k = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为神经元, $i = 1, \dots, n$ ;  $m$ 为学习样本数目; $n$ 为输入层神经元个数。

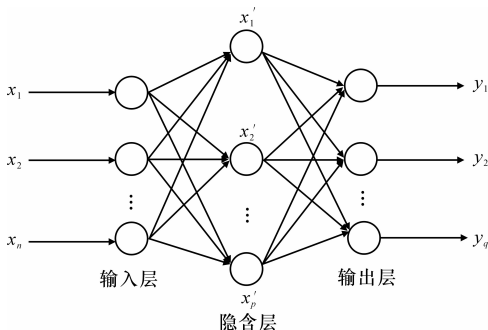


图1 3层BP神经网络模型

对应输入模式的输出向量 $\mathbf{Y}_k = (y_1, y_2, \dots, y_q)$ ,其中 $q$ 为输出神经元个数,中间层各单元的输入 $S_j$ 按下式计算

$$S_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} x'_i - \theta_j \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

式中: $W_{ij}$ 为输入层至中间层的连接权, $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $\theta_j$ 为中间层神经元的阈值; $p$ 为中间神经元的个数; $x'_i$ 为计算神经元。

为模拟生物神经元的非线性特性,以 $S_j$ 作为S型函数(Sigmoid函数)的自变量,计算中间层各神经元的输出,S型函数取为

$$f(x) = 1/[1 + e^{-(x/x_0)}] \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 为激励函数; $x_0$ 为初始值。

中间层神经元激活值 $b_j$ 为

$$b_j = f(x) \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

信息从输入层流向输出层,给定输入信息,便得到相应的输出结果。

理论上已经证明,存在一个3层网络,能够以任意精度实现任意连续函数的映射;而映射的实现要对网络进行训练,其训练过程如下。

(1) 权值和阈值初始化,即给一个(0,1)区间内随机值初始化权值和阈值。

(2) 给定输入模式对矢量和输出模式对矢量。

(3) 计算实际输出矢量。

(4) 修正值,即从输出层开始,将误差信号反向传播,修正各权值,使误差最小。

(5) 用希望输出模式对及网络实际输出计算中间层各神经元的一般化误差。

(6) 用连接权 $U_{jt}$ 、输出层一般化误差 $e_t$ 和中间层 $b_j$ ,计算中间层各神经元的一般化误差 $e_j^k$ ,其计算式为

$$e_j^k = \left( \sum_{t=1}^q dU_{jt} \right) b_j (1 - b_j) \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (5)$$

式中: $d$ 、 $b$ 均为计算神经元。

(7) 用输出层各神经元的一般化误差 $e_t$ 以及中间层各单元的输入,修正连接权和阈值。

(8) 用中间层各神经元的一般化误差 $e_j^k$ 和各神经元的输入,修正连接权 $W_{ij}$ 和阈值 $\theta_j$ 。

(9) 选取下一个学习模式对提供网络,返回到步骤(3),直至全部 $m$ 个模式对训练完毕。

(10) 重新从 $m$ 个学习模式对中随机选取1个模式对,返回步骤(3),直至网络全局误差函数小于预先设定的一个极小值,即网络权值或学习次数大于预选设定值,网络无法收敛。

BP 神经网络按有学习目标的方式进行学习,当为网络提供一对学习样本后,经过神经网络内的工作信号一系列正向传播,得到网络的输出值;然后根据期望输出与网络的实际输出间的误差,按反向误差信号对网络进行调节;这样,随着学习过程的不断迭代进行,网络的实际输出值也就逐渐逼近希望输出值。本文基于上述参数反演理论,借助 Matlab 数学计算工具箱编制计算程序,较好地实现了上述参数的反演过程。

## 2 工程算例

### 2.1 工程地质环境与工程概况

某高速公路拓宽工程在原有 4 车道基础上两侧各加宽 2 个车道进行扩建,原路基宽度为 26 m,扩建为 8 车道后路基宽度为 42 m。全段路基平均填土高度为 4.08 m,最高填土高度为 10 m。现场监测路段地势平坦,地表上层多为黄色、灰黄色低液限粉土和低液限粘土,为软塑或流塑状,局部含灰黑色淤泥质软弱土夹层,呈流塑状,工程性质较差;下部多为黄色或灰黄色中细砂层,并夹有粘土或粉土薄层,呈中密或密实状,工程性质较好。选取 3 个具有典型地质条件的断面进行观测,桩号分别为 K36+213、K41+117 和 K51+008,观测点填方高度  $h$  分别为 6.0、7.8、5.6 m。对断面进行新老路基表面沉降观测;观测断面测点基本布置和仪器埋设如图 2 所示。沉降观测从 2008 年 3 月 18 日铺筑第 1 层填土开始,至 2009 年 12 月 21 日结束,共获得 282 d 的沉降实测数据。

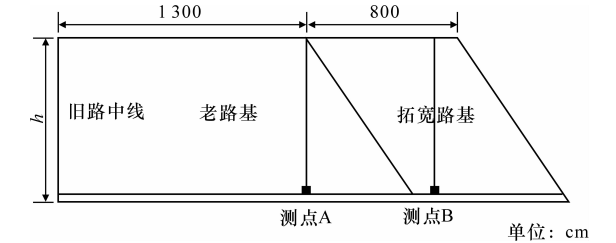


图 2 拓宽路基沉降监测的测点布置

### 2.2 拓宽路基沉降有限元分析方法

在实际问题的正演分析中,常采用结构分析的有限元法。有限元法是适应计算机而发展起来的一种有效的数值分析方法,其突出优点是适用于处理非线性、非均质和复杂边界、复杂模型等问题,而高速公路扩建工程中新老路堤变形分析恰恰就存在这些问题,因此很适宜用有限元方法进行分析。本文基于有限元分析软件 MARC,并根据反演分析,需要对拓宽路基的沉降特征进行数值分析,有限元计

算模型依据观测现场实际而定,计算时仅考虑自重应力,网格划分如图 3 所示。

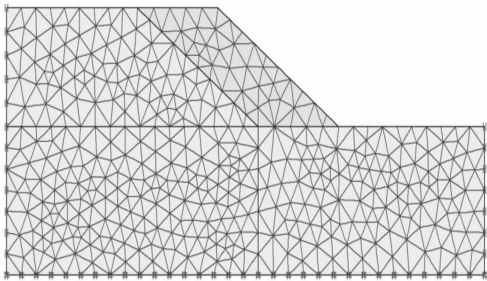


图 3 有限元计算模型网格划分

### 2.3 反演分析结果

用 BP 神经网络进行拓宽路基沉降计算参数的反演分析,其基本过程如下。

- (1)进行有限元分析正演问题的求解,得到反映拓宽路基变异性特征的输入和输出关系的样本。
- (2)采用 BP 神经网络对上述样本进行学习训练,在一定收敛条件下得到相应的权值矩阵和阈值向量。
- (3)采用训练后的 BP 神经网络,对实测沉降变形进行网络仿真,得到拓宽路基新老路基沉降数值分析计算力学参数。

根据 3 层 BP 神经网络反演分析方法,把拓宽路基测点的实测值作为输入单元,相关测点计算值作为输出单元,根据神经网络理论与方法,对 1 个具有多输出的 BP 神经网络,可以用多个单输出的 BP 神经网络替换,使网络结构更简单,预测能力更强。本文反演分析的 BP 神经网络为 1 个具有 5 个输出参数的多输出 BP 神经网络,采用 5 个参数输出的 BP 神经网络替换,即对每 1 个反演参数建立 1 个 BP 神经网络,逐一进行反演计算。本文根据测点前 92 d 的观测数据,利用神经网络反演分析,得出的参数值见表 1。

表 1 计算参数最终反演结果

分类	重度 $\gamma_d$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c$ / kPa	摩擦角 $\varphi$ / ( $^\circ$ )
新路基土	20.322	40.321	0.321	30.874	28.214
老路基土	19.805	40.347	0.351	30.005	25.369
地基土	19.815	20.814	0.353	20.005	22.571

### 2.4 沉降曲线增长趋势

根据现场前 92 d 的实测观测数据进行参数反演,结合反演参数最终输出结果,利用有限元软件计算了 552 d 的拓宽路基沉降值,如下页图 4 所示。由图 4 可知,由于新老路基地基固结程度的差别,老路基与地基沉降变形不大,趋于稳定,最大沉降值位

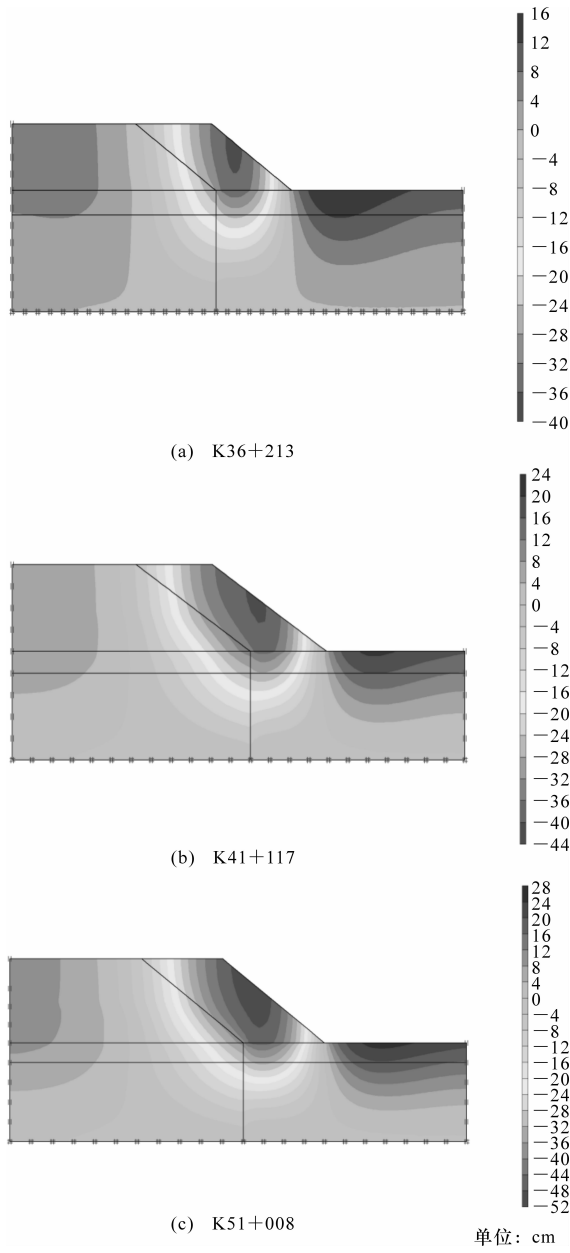


图4 拓宽路基模型沉降有限元计算云图

于新拓宽路基形心处。

图5为测点B沉降观测值与有限元分析计算值的比较。由图5可以看出,实测沉降值曲线和有限元计算沉降值曲线基本吻合,说明基于BP神经网络法的位移反演分析方法安全可靠。从图5所显示的预测结果来看,在路基铺设完成后300 d,拓宽部分路基的沉降基本趋于稳定,即在铺设拓宽路面结构层之前,最好能保证新老路基有10个月的沉降期,这样就可避免拓宽路面结构因受到过大的弯拉应力而破坏。

3 结 语

(1)单纯采用有限元方法对拓宽路基工后沉降

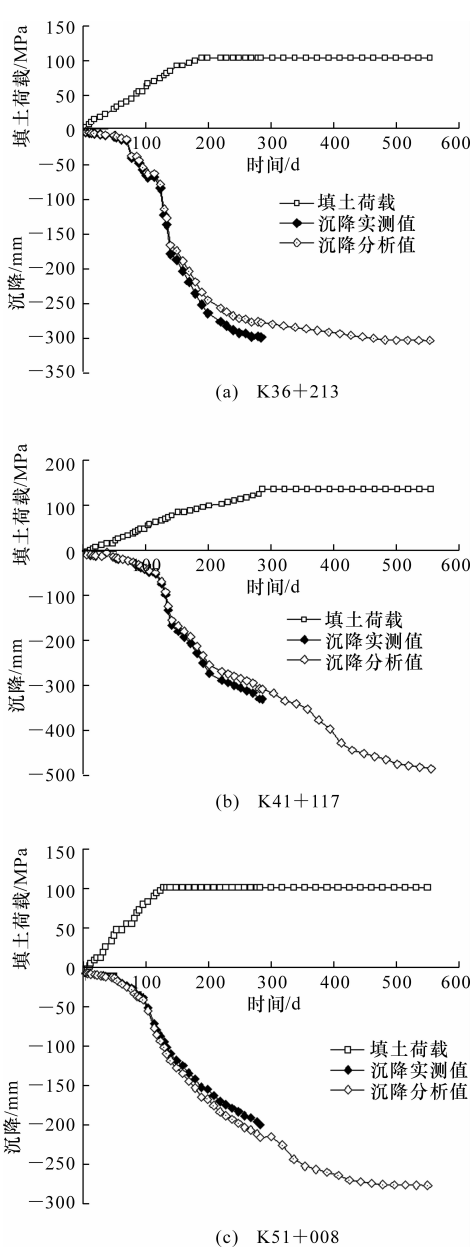


图5 测点B现场实测与有限元计算沉降值的比较

进行预测时,计算结果的精确与否不仅取决于对材料参数与本构关系的合理选取,还取决于对实际施工状况的真实模拟;实际施工中,施工状况往往很难凭感观判断,故根据位移监测结果,采用位移反演分析方法确定等效的材料参数是模拟施工状况的有效方法。

(2)运用BP神经网络方法对拓宽路基荷载地基的沉降值进行预测,预测值与实测值虽有一定差异,但也在一定程度上反映了位移变化的趋势与数值;运用计算模型参数的反演分析结果对拓宽工程施工过程动态控制有重要的指导意义;同时,反演结果可以反馈到新老路基差异沉降控制措施设计方案中,并给予修正。

## 参考文献:

## References:

- [1] 舒阳,孟庆山,舒思齐.高速公路拓宽路基软土工程特性试验[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(3):37-42.  
SHU Yang, MENG Qing-shan, SHU Si-qi. Experiment on engineering characteristics of soft clay on expressway widening foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(3): 37-42.
- [2] 钱劲松,凌建明.路基拓宽工程中桩承式加筋路堤处理的数值分析[J].交通运输工程学报,2008,8(5):67-71.  
QIAN Jin-song, LING Jian-ming. Numerical analysis of application for pile-supported reinforced embankment in subgrade widening engineering[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(5): 67-71.
- [3] 傅珍,王选仓,陈星光,等.拓宽路基差异沉降特性和影响因素[J].交通运输工程学报,2007,7(1):54-57.  
FU Zhen, WANG Xuan-cang, CHEN Xing-guang, et al. Differential settlement characteristics and influencing factors of widening subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 54-57.
- [4] 汪浩,黄晓明.软土地基上高速公路加宽的有限元分析[J].公路交通科技,2004,21(8):21-24.  
WANG Hao, HUANG Xiao-ming. Numerical analysis of road widening on soft soil ground by FEM[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(8): 21-24.
- [5] 唐朝生,刘义怀,施斌,等.新老路基拼接中差异沉降的数值模拟[J].中国公路学报,2007,20(2):13-17.  
TANG Chao-sheng, LIU Yi-huai, SHI Bin, et al. Numerical simulation on differential settlement of jointing of new and old roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 13-17.
- [6] 王东耀,折学森,叶万军,等.高速公路软基最终沉降预测的范例推理方法[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(1):20-23.  
WANG Dong-yao, SHE Xue-sen, YE Wan-jun, et al. Case-based reasoning approach to settlement of expressway on soft foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 20-23.
- [7] 叶虔,邱建金.深厚软土工后沉降预测及其参数的反分析[J].工程勘察,2009(11):28-32.  
YE Qian, QIU Jian-jing. Parameter conversion and settlement estimation based on nonlinear variation of parameters in soft clay[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(11): 28-32.
- [8] 曾连灯,刘国明.砂井地基因结三维非线性有限元及材料参数反演分析[J].福州大学学报:自然科学版,2010,38(1):127-134.  
ZENG Lian-deng, LIU Guo-ming. 3D nonlinear FEM analysis of consolidation for soft soil roadbed and back analysis of material parameters[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2010, 38(1): 127-134.
- [9] 赵明华,陈炳初,刘建华.基于Verhulst模型的软土路基沉降预测[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(4):580-583.  
ZHAO Ming-hua, CHEN Bing-chu, LIU Jian-hua. The prediction of soft clay roadbed settlement based on Verhulst Model[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2007, 23(4): 580-583.
- [10] 魏丽敏,何群,王永和.软土路基大应变黏弹塑性正/反分析沉降预测对比[J].岩土力学,2010,31(8):2630-2636.  
WEI Li-min, HE Qun, WANG Yong-he. Comparison of settlement prediction from back analysis with forward analysis for embankment on soft soil foundation based on large strain and visco-elastoplastic model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2630-2636.
- [11] 陈建峰,石振明,孙红.软土地基路堤工程信息化施工技术[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(1):37-40.  
CHEN Jian-feng, SHI Zhen-ming, SUN Hong. Information-oriented construction techniques for embankments on soft soils[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(1): 37-40.
- [12] 焦李成.神经网络的应用和实现[M].成都:成都电子科技大学出版社,1993.
- [13] Masri S F, Chassiakos A G, Ganghey T K. Identification of nonlinear dynamic system using neural networks[J]. Journal of Applied Mechanics, 1993, 60(1):123-133.
- [14] 周建春,魏琴,刘光栋.采用BP神经网络反演隧道围岩力学参数[J].岩石力学与工程学报,2002,23(6):941-945.  
ZHOU Jian-chun, WEI Qin, LIU Guang-dong. Back analysis on rock mechanics parameters for highway tunnel by BP neural network method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 23(6): 941-945.