

高速公路软土路基沉降预测方法分析

刘 鹏¹, 陈泽松², 赵 明², 夏元友¹, 冯仲仁¹

(1. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070; 2. 广东省路桥发展有限公司, 广东 云浮 510635)

摘 要: 对软土路基沉降预测方法发展现状及存在的问题进行了分析, 介绍了几种软土路基沉降预测方法以及每种方法的适用性, 指出应根据工程的实际条件选择合适的方法。通过比较分析, 提出了基于人工神经网络并结合遗传算法优化来预测软土路基沉降的方法。

关键词: 高速公路, 软土路基, 预测方法

中图分类号: TU433 **文献标识码:** B **文章编号:** 1004-3152(2005)03-0052-04

1 引言

上世纪 90 年代以来, 我国高速公路建设取得了很大的发展, 到 2003 年底已建成高速公路总里程超过 20 000 km, 跃居世界第二位。我国沿海诸省市, 特别是珠江三角洲地区的公路地基存在大量的软粘土, 其含水量大, 压缩性高, 沉降量大, 排水固结稳定性差。若不经处理或处理不当, 会出现路堤沉降量过大, 引起路面、桥台破坏, 桥头跳车等问题。随着高速公路的建设规模加大, 软土问题越来越突出, 已成为影响工程质量, 工期和造价的关键因素之一。在软土地基上修筑高等级公路路堤, 最突出的问题是稳定和沉降。为掌握路堤在施工期中的变形动态, 就必须进行动态观测。一方面保证路堤在施工中的安全和稳定; 另一方面能正确预测工后沉降, 使其控制在设计的允许范围之内。因此, 对路基的沉降变形进行观测、预测, 具有重要的实际工程意义。

2 软土路基沉降机理分析

工程界一般认为, 软土路基在外荷载作用下的沉降经历 3 个不同的阶段, 并表现为 3 种不同类型的沉降特征^[1]: 瞬时沉降 S_d ; 主固结沉降 S_c 和次固结沉降 S_s 。地基沉降计算的理论公式, 一般表示为:

$$S(t) = S_s(t) + S_d + S_c(t). \quad (1)$$

瞬时沉降是地基土在不排水加载期间产生的,

在土体一维变形情况下, 瞬时沉降很小。当土体完全饱和时, 由于土中水及土颗粒本身的变形可忽略不计, 故瞬时沉降接近于零。对于土体在二维或三维变形情况下, 则瞬时沉降在地基总沉降量中占有相当大的比例, 它的发生非常迅速。主固结沉降是当孔隙水从土体中流出后, 引起土体体积随时间而减小, 因而路基逐渐发生沉降, 随着超孔隙水压力的消散, 水流的速率将降低, 土体有效应力增加, 主固结沉降也逐渐增加。次固结沉降一般定义为当土体中超孔隙水压力基本消散后地基所产生的沉降。这部分沉降通常较小, 且历时很久。在主固结完成后, 沉降与时间的关系表现为次固结沉降或蠕变沉降。

3 软土路基沉降预测方法的发展现状

公路软基沉降预测是目前高速发展的软土地区高速公路建设中亟待解决的一大技术难题。自从太沙基(1923 年)的有效应力原理及其固结理论问世以来, 地基沉降计算理论的研究已取得了长足进展。关于地基沉降问题已形成多种计算方法^[2], 大致可分为三类: 一类是基于弹性理论结合太沙基固结理论的解析方法或称理论公式法; 第二类是 Biot 固结理论结合多种本构模型的数值分析法; 第三类是基于实测沉降时间过程的各种经验推算法。这几种方法互为补充, 已成为地基沉降计算的主要手段。然而由于土体本身的复杂性, 以及软土强度低、压缩性大、受施工扰动的影响大、变形稳定时间长、施工过程中存在的随机不确定因素等, 使得利用现有的沉

降计算方法预测公路软基沉降的准确性尚无法得到较好的解决。例如用分层总和法计算沉降时未能考虑土体非线性以及土体侧向变形对沉降的影响,在不同地质、加载条件下沉降修正系数的选用也有一定难度;用数值分析方法时,对各种本构模型的识别以及模型参数的确定方面还存在着不同程度的困难;而经验推算法不能考虑土质条件、加载方式以及观测数据随机性对沉降的影响。软土地基总沉降预测目前国内最常用的方法是应用经验系数校正法^[3],它分析模式简单,将理论计算与实际工程经验数据紧密结合,但其计算结果的可靠性在很大程度上取决于沉降系数的选取。相关规范规定:“地基的总沉降宜采用沉降系数 m 与主固结沉降 S_c 计算: $S = mS_c$, m 为一经验数据,与地基条件、荷载强度、加荷速率等因素有关,其范围值为 1.1~1.7,应根据现场沉降观测资料确定”。在规范说明中指出“在设计时,对沉降系数的取值不能取其平均值,也不能保守地取最大值”。在实际应用中,经常碰到如下两个问题:(1)沉降系数有相当数量介于 0.8 和 1.1 之间,经常超出了规范所规定的范围;(2)沉降系数值究竟如何相对定量确定,规范条款中未曾明朗化。

目前计算沉降量与时间关系的方法有两大类^[4]。第一类为根据固结理论,结合各种土的本构模型,计算地基最终沉降量的各种有限元法。如考虑非线性弹性模型及弹塑性模型的有限元法,考虑粘弹塑性模型的有限元法,考虑结构性的损伤模型的有限元法,以及大变形固结有限元方法。但是由于计算参数较多,且一般需通过三轴试验确定,因而在工程设计中难以采用,目前还不可能把有限元法作为每个断面沉降计算的主要方法应用于设计,主要用于重要工程、重点地段的计算。第二类为根据实测资料推算沉降量与时间关系的预测方法。如指数曲线法,双曲线法和高木俊介法以及曾国熙 1975 年改进的高木俊介法等。事实上,这些预测方法难以反映全过程的沉降量与时间的关系。

4 软土路基沉降预测方法分析

在公路施工过程中,为了控制施工进度,指导后期的施工组织与安排,同时保证路基的稳定与适用,需要对路基的沉降量进行计算预测。用土工试验指标按常规的一维固结理论进行理论计算是常用的方法,但其结果往往与实测结果相距甚远,这是因为地基沉降多属于三维课题且实际情况又很复杂,因此利用沉降观测资料推算后期沉降(包括最终沉降)有

着重要的现实意义。根据实测资料来推测沉降量,归纳起来主要有这几类方法:曲线拟合法,反分析方法,多元非线性相关分析法,灰色系统法,有限元法,BP 人工神经网络法等。现对以上各种方法作一简要论述。

4.1 曲线拟合法

路基工程中常用分层总和法进行沉降计算。该法是假定地基土为一维弹性体,未考虑土体的侧向变形、土的非线性特性及土层间的相互作用等影响因素,从而造成了沉降计算结果与实测值之间有相当大的误差。国内外实测资料表明:对正常固结粘性土地基,用分层总和法计算的沉降量一般比实测沉降量小;而对于超固结粘性土地基,计算结果一般较实测沉降量大,理论计算值与实测值之间的比值介于 0.7~1.5 之间。为了改善沉降计算结果,根据实测资料统计分析常用经验系数对分层总和法进行修正。我国现行的《建筑地基基础设计规范》和《公路桥涵地基与基础设计规范》等即采用了此法。其中修正系数是一个综合经验系数,是根据建筑物长期观测资料得到的。利用实测资料推求沉降避免了室内试验和理论计算假设条件中存在的问题。因此,分析实测沉降与时间关系采取经验估算方法,即为沉降与时间曲线选配适当的函数方程,然后再进行计算。目前,工程上常用的拟合曲线有:指数曲线法,双曲线法及沉降时间倒数法等^[5~7]。

曲线拟合方法属于经验方法,即采用与沉降预测曲线相似的曲线进行拟合,然后外延求出后期沉降量。双曲线型、对数曲线型经验公式具有需要样本分布典型、信息参数多的不足和缺陷,且人为地将软土地基的沉降与时间曲线假定为某一数学模型,由此使得沉降计算值与实际值之间存在一定距离。其推算原理不强,理论性不够明确,预测精度不高,也会因实测沉降时间不够,无法用拟合推测,但比较简单明了,所以有一定的实用性。

4.2 反分析方法

通常情况下,计算地基土的沉降所采用的计算模型参数是由室内试验确定的。然而由于土样在取土、运输过程中的扰动,现场和试验两者边界条件的差异,以及地基土分布的不均匀,由室内试验测定的参数往往与实际值存在较大差异。运用实测沉降数据反演地基主要固结参数,再进行地基沉降预测的反分析方法。该方法考虑几种常用的地基处理方法,利用早期的沉降实测数据和准确的加载信息,可以预测更长时间内的累计沉降量、沉降速率、工后沉降和最终沉降量,同时也可以推算出一些土体主要

变形的平均参数。计算出任意时刻地基的沉降值,并可以画出沉降—时间关系曲线。

反分析方法具有较高的实用价值,这不仅能够指导软基路段的加、卸载施工,而且能够得到实测的参数来修正实验室试验参数,同时还可以给相似地基高速公路的设计、施工提供参考依据。但是反分析方法受到所选择的预测模型精度的影响。

4.3 多元非线性相关分析法

在沉降预测方面,大部分的预测是针对工后沉降问题对最终沉降的预测,而在软土地基上修建高速公路时,如何控制填土速率,在工程中,往往是通过沉降观测分析等来指导施工。多元非线性相关分析法能对沉降中短期进行预报^[8],可以有效地预测未来一段时间的沉降,从而对调整工程进度很有意义。

该方法在广(州)梧(州)高速公路软土路基沉降预测中,选取了表面沉降量、分层沉降量、侧向位移和孔隙水压力等作为相关因素,且选取直观反映软土路基稳定的表面沉降因素作为目标函数。根据实测数据进行相关系数分析,通过两步筛选后确定预报因素,进而列出回归方程,运用 MATLAB 数学工具编程求解,并将回归方程还原为非线性方程,最后拟合出目标函数表面沉降与时间之间的关系,并进行短期预测,应用效果较好。但是该方法不能对软土路基沉降作长期预测,并且要求样本量大且有较好的分布规律等。

4.4 灰色系统法

灰色系统理论的基本思路是:首先对数据进行累加处理(1—AGO),使观测数据序列的随机因素影响淡化,从而提高观测数据序列的内在规律,然后再将数据序列建成一个变量具有微分、差分、近似指数规律兼容的灰色模型^[9]。

利用灰色模型(GM)进行预测,它对实测数据没有严格的要求,而且灰色预测还是一个动态预测,它可以根据新增加的实测数据而相应地变动模型,而计算程序不需要变化,这正好适应于软土路基的信息化施工。用灰色模型预测软土路基最终沉降量的计算程序,对观测数据不需要进行特殊处理,因而不会出现与实际不符的情况,具有一般性,它克服和弥补了传统模型需要样本分布典型、信息参数多的不足和缺陷;它具有要求数据少、计算简单而严密、精度高等优点。其计算结果比用三点法、双曲线法的预测结果具有更高的精度。当然,灰色模型的信息参数是决定模型是否取得良好精度的关键,灰色模型虽然是动态的,但其建模的前提是要求原始时

间序列隐含着指数变化规律。

4.5 有限元法

有限元法是将地基和结构作为一个整体来分析,将其划分网格,形成离散体结构,在荷载作用下算得任一时刻地基和结构各点的位移和应力^[10]。其中基础底面的竖向位移就是所要求的沉降量,有限元法分为弹性有限元法和弹塑性有限元法。土的弹性应力—应变数学模型包括线性和非线性弹性模型。目前应用较广的是邓肯—张双曲线非线性弹性模型。它可以考虑应力历史,土与结构共同作用,复杂的边界条件,施工逐级加荷、土层的各向异性等对变形的影响因素。但是它的缺点是计算工作量大,参数确定困难大,要做三轴排水实验。

4.6 基于 MATLAB 的 BP 人工神经网络法

神经网络工具箱是 MATLAB 环境下所开发出来的许多工具箱之一。它是以人工神经网络理论为基础,用 MATLAB 语言构造出典型神经网络的激活函数,使设计者对所选定网络输出的计算,变成对激活函数的调用。另外,根据各种典型的修正网络权值的规则,加上网络的训练过程,用 MATLAB 编写出了各种网络权值训练的子程序,直接调用即可。

地基沉降受多种因素的影响和制约,其变化的自然规律很难用一个显式的数学公式予以表示。而人工神经网络是这一领域的一个突破,该方法视传统函数的自变量和因变量为输入和输出,将传统的函数关系转化为高维的非线性映射,而不是显式的数学表达式。该方法在处理非线性问题上,具有独特的优越性。在针对软土地基沉降预测时,就是利用实测资料对复杂的非线性的土工结构进行直接建模。具体做法是:先应用 ANN 建立沉降影响因素参数(如处理方式、软土层厚度、地基硬壳层厚度、软土的压缩模量、硬壳层的压缩模量、路堤宽高比、施工期和竣工时沉降量等)与沉降之间的非线性关系,再将待测点的实测沉降影响因素参数输入到已训练好的网络中,即可得到预测的沉降量^[11,12]。

虽然反向传播法得到广泛的应用,但也存在自身的限制与不足,具体表现有:(1)对于一些复杂问题,可能要进行长时间的训练;(2)完全不能训练,网络出现麻痹现象;(3)陷入局部极小值,不能保证所求解为误差平面的全局最小解。为了避免这些问题,本文提出采用遗传算法解决了传统优化方法对于复杂优化问题容易陷入局部最小的问题。近年来发展起来的遗传算法(GA)是借鉴生物的自然选择和遗传进化机制而开发出的一种全局优化自适应概率搜索算法,它可克服神经网络方法的缺点。它使

用群体搜索技术,通过对当前群体施加选择、交叉、变异等一系列遗传操作,从而产生出新一代的群体,并逐步使群体进化包含或接近最优解的状态^[13]。采用遗传算法和神经网络相结合,既利用了神经网络的非线性映射网络推理预测功能,又利用了遗传算法的全局优化特性,二者结合相得益彰,不仅提高了沉降预测精度,而且使得计算操作可行,沉降预测更能反应工程实际。

5 结束语

为了得到较为准确的后期沉降量推算结果,必须对路基的沉降进行准确的观测,应该在路堤开始填筑时就进行观测,同时应尽可能地进行长期观测,在数据处理时应选择有实际意义的数据。而且在实际的沉降预测中,并不单纯地依赖某一种方法,只有对每一种计算方法的原理、优缺点和计算结果的精度都有了了解之后,才能在实际的运用过程中灵活地选择。

基于人工神经网络并结合遗传算法进行优化的方法,在高速公路软土路基沉降预测中应该是一个发展方向。另外,近年来有限元方法发展迅速,在沉降计算时有其独特的优势,也应该是个发展方向。

参 考 文 献

[1] 折学森. 软土地基沉降计算[M]. 北京:人民交通出版社,

1999.

- [2] 钟才根,丁文其,王茂,张胜. 神经网络模型在高速公路软基沉降预测中的应用[J]. 中国公路学报,2003,16(2)
- [3] 刘银生,杨东援. 公路软土地基总沉降预测研究[J]. 公路交通科技,1999,16(3)
- [4] 宰金珉,梅国雄. 全过程的沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学,2000,21(4)
- [5] 钱玉林,丁毅. 路基沉降预测及其工程应用[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2001,4(2)
- [6] XU Yong-ming, XU Ze-zhong. A new method to predict the settlement of embankment[J]. Journal of Hehai University, 2000,28(5)
- [7] ZAI Jin-min, WEI Guo-xiong. Forecast method of settlement during the complete process of construction and operation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4)
- [8] 武汉理工大学. 广梧高速公路软基处理施工仿真监控的现场试验研究(一)[R]. 2003. 7
- [9] 魏迎奇,陈水辉. 基础沉降变形的灰色预测方法[J]. 水利水运科学研究,1998,4
- [10] 董汉刚,胡建军. 高速公路软土路基沉降机理及计算方法[J]. 岩土力学,2002,23(增)
- [11] 周焕云,黄晓明. 高速公路软土地基沉降预测方法综述[J]. 交通运输工程学报,2002,2(4)
- [12] LIU Yong-jian. Prediction of final settlement of soft ground for expressway by using artificial network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000,17(16)
- [13] 陈国良,王熙法,庄镇泉. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1996

On Settlement Forecasting of Soft Clay Subgrade for Expressway

LIU Peng¹, CHEN Ze-song², ZHAO Ming², XIA Yuan-you¹, FENG Zhong-ren¹

(1. Wuhan Univ. of Technology, 430070, Hubei, China; 2. Guangdong Road & Bridge Constr. Dev. Co., Ltd, 510635, Yunfu, China)

Abstract In the article, developing situation and existing problems of settlement forecasting of soft clay subgrade are analyzed. It describes several forecasting methods and their adoptabilities. Suitable methods should be chosen according to actual engineering conditions. By comparison, a method of artificial neural network with genetic algorithm based on MATLAB to forecast settlement of soft clay subgrade is put forward.

Key words expressway, soft clay subgrade, forecasting methods