

地铁隧道施工变形预测研究综述

王铁生¹, 张利平², 华锡生¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450045)

摘要:在分析总结盾构隧道施工地层变形预测方法的基础上, 把变形预测方法分为理论计算法和实测数据分析法两大类, 并对各种方法进行了分析, 指出其不足之处, 认为如何充分利用实测沉降数据和先验信息进一步完善理论模型, 以及采用动态数据模型、模糊智能方法预测后续沉降的大小和规律是地铁隧道施工中需进一步研究的内容。

关键词:地铁隧道; 盾构法; 地表沉降; 神经网络

中图分类号: TU441+.6

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2003)05-0062-04

在软土地层中采用盾构法掘进隧道, 会引起地层移动而导致不同程度的沉降和位移, 由于施工技术质量及周围环境和岩土介质的复杂性, 即使采用最先进的盾构法, 其施工引起的地层移动也是不可能完全消除的^[1]。当地层移动和地表变形超过一定的限度时就会影响到盾构隧道和地表建筑物的正常使用和安全运营, 尤其对于城市地铁, 盾构法区间隧道一般都穿越城市中心地带, 因建筑物密集、施工场地狭小、地质情况复杂、地下管网密布、交通繁忙、施工条件受到限制, 对环境的控制要求更为严格。正确估计可能发生的地面变形, 可以选择最佳的施工技术, 制定一套完善的措施以确保施工地区楼房、建筑物与地下管线等重要设施的安全。国内外已有很多学者开展这一方面的研究。纵观地铁盾构隧道施工时地层沉降预测的研究方法, 可将其分为理论计算法和基于实测数据的实测数据分析法。

1 理论计算法

理论计算法主要有以 Peck 理论为代表而不断发展、完善、改进的经验理论法, 以及以有限元法为主的数值预测法等。

1.1 经验法

1.1.1 地表横向沉降预测

Peck^[2]通过对隧道地表面沉降槽形状的观察以及对大量的实测数据分析, 于 1969 年在墨西哥土力学及地基基础工程国际会议上首次提出了地表沉降曲线近似呈概率中的正态分布曲线的概念。认为施工中引起地表沉降是在不排水的条件下发生的,

所以沉降槽的体积应等于地层的损失量, 并认为地表沉降横向分布的估算公式为

$$s(x) = \delta_{\max} \exp \frac{-x^2}{2i^2} \quad (1)$$

式中: $s(x)$ 为地面沉降量沿横向的分布, mm; x 为所求沉降点距盾构中心线的水平距离, mm; $\delta_{\max} = \frac{V_l}{\sqrt{2\pi}i}$, 为沿盾构掘进中线的最大地面沉降, mm, 其中 V_l 为盾构掘进引起的沿隧道中线单位长度的地层损失量, m^3/m ; i 为沉降槽宽度系数, 即隧道中心线至沉降曲线反弯点的距离。

Attewell^[3]和 Peck 一样也假定沉降槽呈正态分布, 于 1981 年提出下列最大地表沉降预测量, 即式(1)中的 $\delta_{\max}$ 预测公式

$$\frac{i}{R} = K \left(\frac{z}{2R} \right)^n \quad (2)$$

$$\delta_{\max} = \frac{V_l}{\sqrt{2\pi}Ai} \quad (3)$$

式中: R 为隧道开挖半径; z 为从地表到隧道中心的深度; $\delta_{\max}$ 为地表最大沉降量; K, n 为常数; A 为隧道开挖面积。

同济大学岩土工程系对上海饱和软土和软粘土层中地铁盾构隧道试验段进行计算分析, 并与现场测试结果对比, 提出了考虑到固结因素的 Peck 修正公式^[4]:

$$\delta(x, t) = \frac{V_l + H\bar{k}_s t}{\sqrt{2\pi}i} \exp \left(-\frac{x^2}{2i^2} \right) \quad (4)$$

式中: $\delta(x, t)$ 为在任一固结时间 t 内, 距隧道中心

线 x 处的施工沉降量和固结沉降量之和; k_s 为隧道顶部土体加权平均的渗透系数, m/d ; H 为埋深。

1982 年, O'Reilly-New 根据英国粘土和砂性地层的实测数据, 提出两种地层情况下的 i 值计算公式, 然后利用 Peck 经验公式 $\delta_{\max} = \frac{V_l}{\sqrt{2\pi i}}$ 可计算出地表最大沉降量。1977 年, 日本的半谷根据地层条件和围岩种类给出了地表最大沉降量范围。1982 年, 藤田研究了不同盾构型式对地层移动的影响, 根据围岩的种类、盾构型式及辅助施工法的不同给出了地表最大沉降量的预测值及其误差。

经验法只是粗略给出了预测地表沉降的计算公式或范围, 有的甚至有附加条件并需从各自统计表中查取有关参数, 计算出的结果与实测值偏差一般较大。当衬砌形式、刚度不同, 以及施工条件和地层条件等复杂时, 它们的应用将更受到限制。

1.1.2 地表纵向沉降预测

刘建航等^[4]在 Peck 法的基础上, 总结了上海地铁隧道纵向沉降分布的一般规律, 提出了负地层损失的公式, 得出了地面沉降量的纵向分布估算公式:

$$s(y) = \frac{V_{l1}}{\sqrt{2\pi i}} \left[\Phi\left(\frac{y-y_i}{i}\right) - \Phi\left(\frac{y-y_f}{i}\right) \right] + \frac{V_{l2}}{\sqrt{2\pi i}} \left[\Phi\left(\frac{y-y_i'}{i}\right) - \Phi\left(\frac{y-y_f'}{i}\right) \right] \quad (5)$$

式中: $s(y)$ 为纵向地表沉降量; y 为沉降点至坐标轴原点的距离; y_i 为盾构推进起始点处盾构开挖面至坐标轴原点的距离; y_f 为盾构开挖面至坐标轴原点的距离; $y_i' = y_i - l$, $y_f' = y_f - l$, l 为盾构机的长度; V_{l1} 盾构开挖面引起的地层损失(欠挖时为负值); V_{l2} 为开挖面以后因盾尾空隙压浆不足及盾构改变推进方向为主的所有其它施工因素而引起的地层损失。 $\Phi(x)$ 函数可由标准正态分布函数表查得。

1.2 数值法

对地层移动和地表沉降的预测, 国内外都进行了大量的数值模型研究, 其主要方法有有限元法、边界元法、半解析元法等。有限元法又分线弹性、非线性弹性、弹塑性、粘弹性、粘弹塑性等几种。

Finno 和 Clough^[5]采用了二维平面应变方法分别取纵横剖面, 分段模拟了美国旧金山第一座土压平衡盾构隧道的施工过程的地层沉降情况。他们将隧道的开挖过程分为五个阶段, 第一阶段用纵剖面的平面应变有限元分析盾构推力使盾构前方土体的变形行为; 第二阶段将一个向外的椭圆分布的径向压力施加到未衬砌隧道的周边上, 以模拟盾构通过时的鼓起作用; 第三阶段则在隧道周边施加一均匀向内的径向压力, 模拟盾尾空隙的闭合, 当拱顶向内

位移等于盾尾空隙的理论值时, 即认为空隙闭合, 进入第四阶段; 第四阶段考虑衬砌的安装; 第五阶段考虑空隙水压力消散引起的固结作用。该方法的优点是能直接确定扰动带的范围, 且可模拟这部分土体后来的固结。但计算中需凭经验假定径向压力。D. Rensondiz 和 M. P. Romo 也采用了二维平面应变分析方法进行了隧道位移非线性有限元计算, 并对计算结果数据进行了曲线拟合得出了一套公式。实际隧道掘进是一个三维问题, 目前, 很多学者进行了大量的三维有限元隧道地层沉降分析。

Ito 和 Hisatake^[6]用三维常量边界元法分析了均质线弹性地层中的浅埋隧道在开挖面瞬间到达某一位置且隧道周边应力完全释放时, 隧道轴线上方地表变形问题, 但其对建筑空隙处理问题作了简单假设。Lee 和 Rowe^[7]假定土体具有弹性-完全塑性的关系, 用三维弹塑性有限元分析了加拿大安大略省的桑德贝隧道, 引入总间隙参数 G , 分析隧道开挖面推进和隧道施工引起的地层损失。总间隙参数定义为

$$G = U_{3D} + \omega + 2\Delta + \delta \quad (6)$$

式中: U_{3D} 为开挖面推进引起的等效三维径向位移; Δ 为盾尾壁厚; ω 为与施工质量有关的参数; δ 为拼装衬砌的空间。他们认为隧道周边土体自由地向已开挖区内变形, 一旦土体的径向收敛达到总间隙参数, 环状衬砌单元就开始起作用, 且假定土体与衬砌完全接触, 并达到平面应变状态。该方法中的等效三维径向位移 U_{3D} 的物理意义较为含糊, 且没有考虑注浆的作用。

刘红洲等^[8]采用三维有限元方法对影响地面沉降的各个因素如注浆量、盾体长度、推进步长、开挖面推进力、盾尾建筑空隙等分别进行了讨论, 计算了各因素影响的地层沉降大小, 并总结了地层沉降的规律, 但对于建筑空隙等参数的大小讨论过于简单, 只是凭经验加以确定。李强等^[9]假定在不排水的条件下利用弹塑性三维有限元分析了盾构千斤顶推力变化时对盾构隧道地面沉降的影响。施建勇等^[10]采用沿轴向和横向解析、竖向离散的半解析方法分析了盾构隧道地表变形问题, 虽对衬砌和盾构都进行了模拟, 但未考虑超挖和回填注浆等问题, 实际测试数据与计算有一定的差距。孙钧等^[11]用三维弹塑性有限元分析了上海地铁交叠盾构隧道施工变形问题, 其对土体各参数根据实测值进行了不同程度的折减, 虽对盾尾空隙进行了考虑, 但只是凭经验给予的确定值。张冬梅等^[12]考虑随时间不断增大的固结沉降采用了粘弹性有限元法分析了盾构推进引起的地面沉降。田文等^[13]利用粘弹塑性有限元法分析了浅埋隧道的稳定性, 但模型的选取比较困难, 同时模

型的参数也不易确定。

1.3 随机理论模型预测

刘宝琛等^[14]在随机介质概念的基础上建立了横向和纵向地表沉降槽预测公式。随机介质理论是把地层移动看成一个随机过程,并用柯莫哥洛夫方程表示。其本质是沿用了矿山开采中引起地面位移的一种方法,预测盾构隧道沉降结果与实际情况难免有一定的差距。

尽管已研究了上述多种理论预测方法,但因各地区地基层种类繁多,施工方法、施工状态千差万别,同时使用的盾构类别也不同,可以说目前尚未研究出能考虑所有影响因素的地层沉降预测方法。三维有限元数值分析法基本上能够模拟各种工况以及各种因素影响的相互作用,并且可重复性好,无疑是进行上述研究的非常重要的工具。使用数值方法进行计算、预测的研究非常多,虽然可以较为全面的考虑多层地层、盾尾空隙、臂后注浆等施工因素,但数值方法在地层移动和地表变形预测研究中,力学参数的选取和本构关系的确定不完全符合工程实际,尤其是确定合适的弹塑性和粘弹塑性的本构模型和土体的各种参数是很困难的。因此,数值方法尚不能成为较为实用、准确的计算方法。

2 实测数据分析法

隧道开挖后,周围围岩及支护随之发生位移,该位移是围岩和支护力学行为变化的最直接反映。不管其作用机理如何复杂,其效果均通过位移表现出来。利用已开挖的隧道现场实测变形数据,通过建立数据模型可较好地预测和预报后续开挖地层的变形。

2.1 统计分析法

统计分析法(回归分析)是目前广泛应用的变形成因分析法。它是以前测数据为基础,利用所测量的影响因素和变形值,用回归分析建立两者之间的函数关系,有了这种函数关系后就能够预报变形,还可进行变形的物理解释。观测资料愈丰富、质量愈高,其结果愈可靠。但由于回归分析中,选用何种因子系用何种表达式有时只是一种推测,而且影响变形因子的多样性和某些因子的不可测性,使得回归分析在某些情况下受到限制。同时,此方法用平均曲线进行拟合、预报,不足以准确地反映观测值的离散性和随机波动性。回归模型是一种静态模型,它只是反映了变形值相对于自变量之间在同一时刻的相关性,而没有体现变形观测序列的时序性、相互依赖性以及变形的继续性。

如果以单变量时间为自变量来建立变形预测模型,即进行趋势分析,通常是定量预测的首要一步,

可发现主要的变化趋势,预测最终的沉降量。

2.2 时间序列分析

随着变形分析研究的全面开展,人们认识到变形体的变形是在各种荷载(力)作用下的动态连续过程,变形体是具有惯性、记忆和时序的动态系统,其变形值,即系统输出(结果)变量不仅依赖于同时刻的,而且还依赖过去输入的变量的值。变形体还不断受到外界环境的影响,在各种荷载的作用下发生着能量的转移和变化。当变形的成因分析不可能把一切因子都赋予清晰的物理概念而始终离不开一个经验性的参数的时候,在许多因子的关系方面普遍存在得到的信息不充分,很难建立清晰函数关系的情况下,利用时间序列分析和灰色系统理论等建立数学模型来逼近、模拟和揭示变形体的变形规律和动态特性成为新的研究方向,在动态变形分析的研究方面已取得不少成果。由于根据地层和地表沉降的实测观测数据可组成一个离散的随机时间序列,因此,可采用基于实测数据的时间序列分析理论与方法来分析、趋势预测或预报地层的沉降规律。

对于小数据量的时间序列,可采用灰色系统理论建模,通过对原始数据列采用累加生成法变成生成数列,可以减弱随机性,增加规律性。最典型的时间序列模型是 p 阶自回归 q 阶滑动 $ARMA(p, q)$ 模型。潘国荣^[15]利用 $AR(q)$ 和顾及临近点变形因素项的动态模型 $CAR(q)$ 对上海地铁盾构隧道地表和隧道内沉降进行了分析和预测,但模型较为简单,预测精度有待进一步提高。若采用动态数据处理系统或趋势函数模型加 $ARMA(p, q)$ 自回归滑动平均模型预测效果较好^[16]。

2.3 神经网络智能预报

传统的用于位移序列演化特征的建模方法主要是利用时间序列分析法,如 AR 法、 $ARMA$ 法和 $ARIMA$ 法等,其本质上仍属于回归分析,都是利用一确定的模型函数来表达变量间的关系,由于岩体结构的复杂性,它所涉及的工程地质条件及岩土特性参数通常是不完全定量的,甚至是随机的、模糊的,故难以用确定性的数学模型加以描述,或者说,影响岩土体系统特性的各要素之间存在着非常复杂的关系,所以岩体力学参数和岩体位移之间有时难以甚至不能用一个简单的代数方程或数学表达式来描述。神经网络由于具有自适应性、非线性及容错性强等特点,特别适合处理各种非线性问题^[17],利用神经网络模型预测盾构隧道地表位移将不失为一种有效的方法。由实测沉降数据、土体参数和施工参数等影响因素资料作为样本,对网络进行训练完后,即可对待估的变量经训练好的网络进行预测预报^[18]。

神经网络具有自适应和学习能力,但它是典型的“黑箱型”的学习模式,模糊系统适合表达那些模糊或不确定的知识,其推理方式比较类似于人类的思维方式,是处理不确定性、非线性和其它不确定问题的有利工具,有较强的解释推理功能^[19]。由于盾构隧道地层沉降影响因素的不确定性(模糊性、随机性、非确知性)及相关性,将模糊技术与神经网络相结合所建立的模糊神经网络用于盾构隧道地表沉降预测,可以克服影响地表沉降各因素与变形量无确定表达式的缺点,通过许多简单的关系来实现复杂的、非线性、非确定性的动力系统,无须知道变形与力学参数、施工参数之间的确切物理关系,从而可摒弃传统上必须依赖的精确数学模型以及土的本构关系,以满足及时、准确地预测盾构隧道地表沉降的要求。

3 结 语

面对地面沉降、滑坡及坍塌给人类的生存所造成的巨大威胁,人们认识到变形监测只是手段,而为施工决策提供的科学预报才是目的,数据处理与模型的建立则是两者的桥梁。由于隧道施工的复杂性,影响因素的多样性和不确定性,不易得到一种准确考虑各种因素的预测和预报方法。根据实测变形值和多种先验信息采用确定性函数反求变形体材料的物理参数(反演分析法),以及本构模型的进一步完善是目前研究的一个方向,同时为了避免采用复杂的计算所带来的不确定性,用二维简化三维分析的实用计算公式有待进一步研究。利用现场实测数据并顾及盾构隧道施工和土体参数的多种影响因素的模糊、智能神经网络预测模型需进一步研究。从应用研究方面来看,单靠任何单一公式和研究方法难以准确地预测沉降变形的大小。多种理论和方法的有机结合与综合比较将是正确分析和研究预测沉降的有效途径。地层沉降预测的理论算法与时间序列法或统计分析等实测数据分析法相结合进行组合预测,以及结合现代卡尔曼滤波和小波理论预测盾构隧道地层沉降的方法将是研究的另一个方向。

参考文献:

- [1] 黄宏伟,张冬梅.盾构隧道施工引起的地表沉降及现场监控[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增):1814~1820.
- [2] Peck R B. Tunneling in soils[A]. In: 10th ICSMFE[C]. Stockholm. 1981:607~628.
- [3] Attewell P B. Engineering contract, site investigation and surface movements in tunnelling works[A]. In: Balkema A A. Soft-ground tunnelling-failures and displacement[C]. Rotterdam.

1981:5~12.

- [4] 刘建航,侯学渊.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991.329~639.
- [5] Fino G J, Clough G W. Evaluation of soil response to EPB shield tunnelling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 115(2):155~173.
- [6] Ito T, Hisatake M. Three dimensional surface subsidence caused by tunnel driving[A]. In: Balkema A A, Elsenstein Z. Proceedings of the Fourth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics[C]. Rotterdam. 1982:551~559.
- [7] Lee K M, Rowe K. Analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay tunnel[J]. Can Geotech J, 1991, 28(1):25~41.
- [8] 刘洪洲,孙钧.软土隧道盾构推进中地面沉降影响因素的数值法研究[J].现代隧道技术,2001,38(6):24~28.
- [9] 李强,曾得顺.盾构千斤顶推力变化对地面变形的影响[J].地下空间,2002,22(1):12~15.
- [10] 施建勇,张静,余才高,等.隧道施工引起土体变形的半解析分析[J].河海大学学报,2002,30(6):48~51.
- [11] 孙钧,刘红洲.上海地铁交叠盾构隧道施工变形问题[J].同济大学学报,2002,30(4):379~385.
- [12] 张冬梅,黄宏伟,王箭明.盾构推进引起地面沉降的粘弹性分析[J].岩石力学,2001,22(3):311~314.
- [13] 田文,夏正中.浅埋隧道稳定性的粘弹塑性有限元分析[J].地下空间,1992,12(2):97~104.
- [14] 刘宝琛,张家生.近地表开挖引起的地表沉降的随机介质方法[J].岩石力学与工程学报,1995,14(4):289~296.
- [15] 潘国荣.地铁隧道轴线贯通测量偏差控制、动态变形分析及预报方法研究[D].上海:同济大学,1999.
- [16] 张正禄,张松林,黄全义.大坝安全监测、分析与预报的发展综述[J].大坝与安全,2002(5):13~16.
- [17] 黄修云,曹国安,张青.人工神经网络在地下工程预测中的应用[J].北方交通大学学报,1998,22(1):39~43.
- [18] 王穗辉,潘国荣.人工神经网络在隧道地表变形预测中的应用[J].同济大学学报,2001,29(10):1147~1152.
- [19] 刘春.用模糊神经网络对建筑物变形进行短期预测[J].工程勘察,1998(6):42~45.

(收稿日期:2003-03-07 编辑:张志琴)

