

Prediction of Ground Subsidence Caused by Metro Shield Construction*

Pengfei Li¹, Lingzhi Yang², Enquan Fang²

¹Beijing Agile Tech Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing

²Guangzhou Metro Corporation, Guangzhou

Email: lpf8588@163.com

Received: Nov. 4th, 2013; revised: Nov. 18th, 2013; accepted: Nov. 24th, 2013

Copyright © 2013 Pengfei Li et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Pengfei Li et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Based on the Guangfo line subway project under construction of the Guangzhou subway, the article studies the rules of the shield construction of surface transverse and longitudinal settlement. It refers to a prediction model using interpolation method and least square method. And the model is applied to the information system as a prediction tool for shield construction site near the ground surface settlement.

Keywords: Shield; Surface Subsidence; Prediction Model

地铁盾构施工引起的地表沉降预测研究*

李鹏飞¹, 杨玲芝², 方恩权²

¹北京安捷工程咨询有限公司, 北京

²广州市地下铁道总公司, 广州

Email: lpf8588@163.com

收稿日期: 2013年11月4日; 修回日期: 2013年11月18日; 录用日期: 2013年11月24日

摘要: 本文依托广州地铁广佛线在建地铁工程研究了盾构施工时地表横向、纵向沉降的规律; 提出一种利用插值法、最小二乘法的预测模型, 并将模型应用到信息系统实现对盾构施工时刀盘附近地表沉降的预测。

关键词: 盾构; 地表沉降; 预测模型

1. 引言

地铁建设为一个高风险工程, 其投资回报率低, 安全风险高, 专业性要求高、特种设备多, 导致安全事故时有发生, 建(构)筑物、管线遭到破坏。随着盾构法在地铁建设中的普及, 越来越多的地铁线路采用盾构法进行施工, 而该方法在岩层内的施工过程中, 必定造成地层损失, 引发地表沉降, 进而造成地面建筑物或者管线的变形破坏, 从而引发经济纠纷与信访

事件的发生。

因此对盾构施工引起的地表沉降进行研究, 建立一种相对准确、可应用性高的预测方法并应用到地铁建设工程中是很有必要的。

2. 研究现状

国内外的学者与工程技术人员已经对盾构施工引起的地表沉降预测方法研究了半个世纪, 取得了一些理论成果与方法^[1], 主要有4类:

*基金项目: 广州市科技计划项目资助(2011Y5-00009)。

经验公式法：主要是基于 PECK^[2]公式进行修正或总结不同地层的经验公式。此类方法对地层条件要求较高，准确率有待提高。

数值分析法：主要采用有限元法、有限差分法、加权余量法和边界元法，结合计算软件进行预测。该方法准确率较高，但该方法对使用者知识水平要求较高，在工程实践中得到广泛推广应用并不现实。

神经网络法：该方法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后续开挖施工引起的地层变形。神经网络法将盾构机掘进参数与地表沉降关联起来进行分析，与信息技术结合后可以更加便捷、直观的指导施工，但目前只在科研中得到应用，并未在工程实践中应用，是未来的发展趋势。

模型试验段法：该方法通过相似理论建立模型，对开挖进行模拟，以实验数据来预测实际沉降。该方法成本较高，一般适用于特大型工程。

尽管国内外对于隧道施工引起的地表沉降已经进行了大量的工作，但是基于经验公式结合信息化技术对地表沉降进行预测研究的并不多，有必要研发基于信息化技术的预测模型。

3. 理论基础

Peck^[2]系统地提出了地层损失的概念和预测隧道开挖引起地表沉降的实用方法，即 Peck 公式：隧道开挖在不排水情况下所形成的地表沉降槽的体积应等于地层损失的体积，假定地层损失在整个隧道开挖方向上均匀分布，并提出了横向的地表沉降槽近似成正态高斯分布的概念，即 Peck 曲线。如式(1)所示。

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中： $S(x)$ ——测点距隧道轴线距离为 x 米的地表沉降量，mm； $S_{\max(x)}$ ——测点距隧道轴线距离为 x 米的地表沉降量，mm； i ——曲线反弯点距隧道中心的距离，m； x ——隧道两侧横向上距隧道中心的水平距离，m。

诸多学者已经证实盾构隧道开挖所引起的横向地表沉降形状近似服从正态分布，沉降曲线为正态曲线。Peck 研究了地表沉降的横向变向规律，用函数的形式表示地表横向沉降的曲线为正态分布曲线，即 Peck 曲线，如图 1 所示。

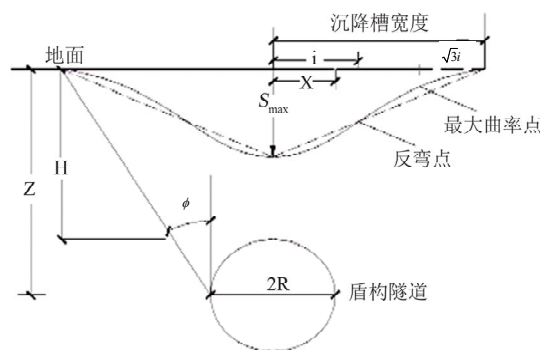


Figure 1. Peck curve diagram
图 1. Peck 曲线示意图

4. 地表沉降规律

由 Peck 理论公式可知，盾构施工引起的地表沉降断面的沉降槽曲线服从高斯分布^[3]，因此需要计算地表最大沉降值、沉降槽宽度系数对应的曲线分布。

4.1. 地质概况

该盾构隧道区间段主要的岩层有：红色砂岩的各风化带；侵入岩的各风化带；炭质灰岩的各风化带；灰岩的各风化带；混合花岗岩的各风化带；流纹质英安斑岩或英安斑岩的各风化带。地铁隧道期间穿越几个不同规模的褶皱和断裂带使得地铁施工过程对地表影响较大且施工存在一定的风险。

4.2. 沉降曲线分析

下面分别研究地表最大沉降值对应的纵断面地表沉降变形规律以及沉降槽宽度系数对应的横断面地表沉降规律。

4.2.1. 横断面地表变形规律分析

1) 数学分析

由于 Peck 对盾构隧道掘进引起的地表沉降分布规律曲线为非线性函数，为了便于进行回归分析计算，需要将 Peck 公式变位线性。对 Peck 公式进行对数计算并回归得到 Peck 公式的回归模型为：

$$\ln S(x) = \hat{a} + \hat{b} \times \left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (2)$$

式中： x_i ——第 i 个监测点距离隧道轴线的代数值； n ——样本监测点个数； a ——常数项的最小二乘估计值； b ——线性系数的最小二乘估计值。

由上式可以得到回归后的 S_{max} 及 i 。即：

$$S_{max} = \exp(\hat{a}) \quad (3)$$

$$i = 1/(\hat{b})^{0.5} \quad (4)$$

将式(3)与式(4)代入 Peck 即可得到以实测数据回归后的代表实测数据分布的 Peck 曲线。

2) 实测数据分析

选取某盾构区间的 YDK21 + 850 断面的实测数据为例进行分析。如下图所示：其中 Y_0 为右线隧道正上方测点，选其横坐标为 0， Z_0 为左线隧道正上方测点。M 为左、右线中间位置。其测点布置位置如下图所示 2 所示。

实测数据如下表 1 所示。

根据表 1 做地表沉降曲线分布散点图如下图 3。

由图 3 可知，右线的最大沉降点并不在右线隧道正上方位置，而是在右线靠右大约 4~5 m 的位置。发生此现象的原因可能是受左线隧道先行的影响。

为了便于计算，将 0 点向左移 5 m，即 M 测点的位置为坐标 0 点，重新整理及各变量转换表如下表 2。

通过上表所示实测地表沉降数据，使用公式分别对 S_{xx} 、 S_{yy} 和 S_{xy} 进行计算。利用公式对回归后常数项 a 和回归后线性系数进行计算，可得 a 为 1.3099， b 为 0.0089。则回归后的线性函数为：

$$\ln S(x) = 1.3099 + 0.0089 \times \left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (3)$$

用式(3)与式(4)可以计算得出 S_{max} 为 3.705803 mm， i 为 10.59998 m。将 S_{max} 与 i 的值代入公式(2)，可以得到经实测数据回归后的 Peck 公式：

$$S(x) = -3.705803 \exp\left(\frac{-x^2}{224.72}\right) \quad (4)$$

也就得到了拟合后的 Peck 曲线。以正负 20 米为

X 的取值范围，画出拟合后的 Peck 曲线并与实测数据进行对比，如图 4 所示。

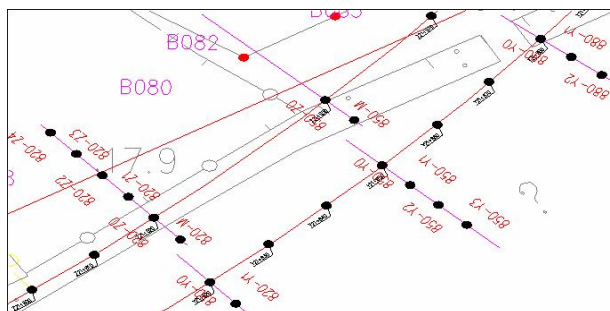


Figure 2. H-S interval measuring point layout
图 2. H-S 区间测点布置图

Table 1. Surface subsidence data
表 1. 地表沉降数据

测点名称	Z ₀	M	Y ₀	Y ₁	Y ₂
X(m)	-10	-5	0	5	10

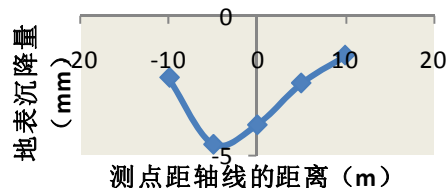


Figure 3. Surface subsidence profile
图 3. 地表沉降分布曲线

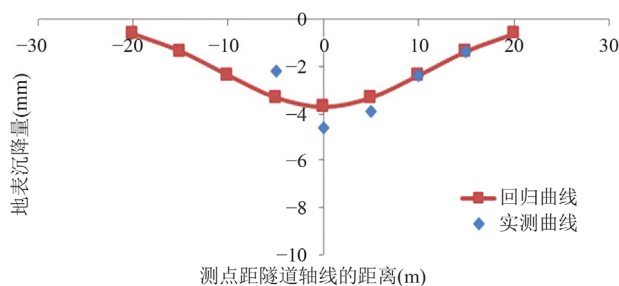


Figure 4. Peck curve fitting with the measured data after comparison chart
图 4. 拟合后的 Peck 曲线与实测数据对比图

Table 2. Regression data conversion table
表 2. 回归数据转换表

里程	样本点	Z ₀	M	Y ₀	Y ₁	Y ₂
YDK21 + 850	X/m	-5	0	5	10	15
	S(X)/mm	-2.2	-4.6	-3.9	-2.4	-1.4
	-x ² /2	-12.5	0	-12.5	-50	-112.5
	LnS(x)	0.78845736	1.5260563	1.3609766	0.8754687	0.3364722

从图 4 中发现, 拟合后的 Peck 曲线与实测数据点的吻合程度较高, 因而可以这样认为用实测数据拟合的 Peck 曲线可以用来表示实测数据的地表沉降分布。本文所研究的实测数据都将以一元线性回归的方式用沉降槽表示^[4]。

4.2.2. 盾构掘进时纵断面地表变形规律分析

选取广佛线某盾构区间左、右线隧道正上方的观测点来分析, 根据监测方案, 在线路中线上方地面每隔 10 m 布设一个沉降观测点, 当这些点位于盾构掘进沉降影响范围时, 考察在同一时间这些观测点沉降量的分布情况。

以刀盘位置里程为横坐标的坐标 0 点, 整理 6 个刀盘位置前方 25 m 至后方 30 m 范围内 Y_0 的沉降值。如下表 3 所示。

根据以上数据作出同一时间刀盘前后测点沉降量变化曲线, 其中横坐标 0 点为刀盘位置, 纵坐标为测点的累计沉降量。

由图 5 中可发现, 在土压平衡盾构机采取同步注浆的掘进情况下, 在机头前方 20 m 到前方 9 m 范围内地面呈正沉降状态, 并向靠近刀盘方向在原有的沉降上逐渐相对隆起, 但仍未超过 0, 地面发生轻微沉降, 沉降值未超过 -5 mm; 在刀盘前方 8~9 m 处, 相对隆起到达最大值, 接近 0 mm, 地面基本无沉降迹象, 部分出现轻微沉降(沉降量小于 1 mm)。大约在刀盘前方 8 m(三菱盾构机长度约为 8.7 m)左右开始产生相对沉降趋势, 一直到机头后方 16 m 左右, 是沉降的主要发展阶段, 这个范围的地层主要受盾构刀盘旋转及开挖面出土卸载影响(刀盘前方 5 m 左右)以及盾

构机通过时盾壳对围岩扰动的影(刀盘后方约 15 m)。在刀盘后方 15 m 以后逐渐趋于稳定, 或者出现相对隆起的现象。在这个范围盾构机机体已通过, 减少了地层的扰动, 再者盾尾脱出后产生的建筑空隙被盾尾同步注浆的浆液迅速补充, 减少了地层的损失从而有效的减少了地表的进一步沉降^[5](说明: 以上结果是盾尾同步注浆正常发挥作用的情况, 如注浆压力设置过大或者过小, 注浆量速率偏大或偏小、注浆 A 液与注浆 B 液比例不合理时, 盾尾过后还会产生相当大的后期沉降, 根据实践表明: 只要注浆不正常, 往往会出现比较大的沉降量^[6])。

Table 3. Statistics section settlement
表 3. 断面沉降统计表

刀盘里程	坐标	测值(Y/m, S(y)/mm)				
YDK22+260	Y	-10	0	10	20	30
	S(y)	-1.97	-1.85	-1.92	-2.9	-2.57
YDK22+262	Y	-12	-2	8	18	28
	S(y)	-1.68	-1.2	-1.06	-2.02	-1.08
YDK22+264	Y	-14	-4	6	16	26
	S(y)	-1.85	-0.55	-1.12	-1.69	-1.15
YDK22+267	Y	-17	-7	3	13	23
	S(y)	-2.05	-0.59	-1.28	-1.96	-1.39
YDK22+293	Y	23	13	3	-7	-17
	S(y)	-2.97	-3.98	-4.13	-1.26	-3.27
YDK22+302	Y	32	22	12	-8	-18
	S(y)	-3.46	-4.69	-4.72	-1.24	-3.37

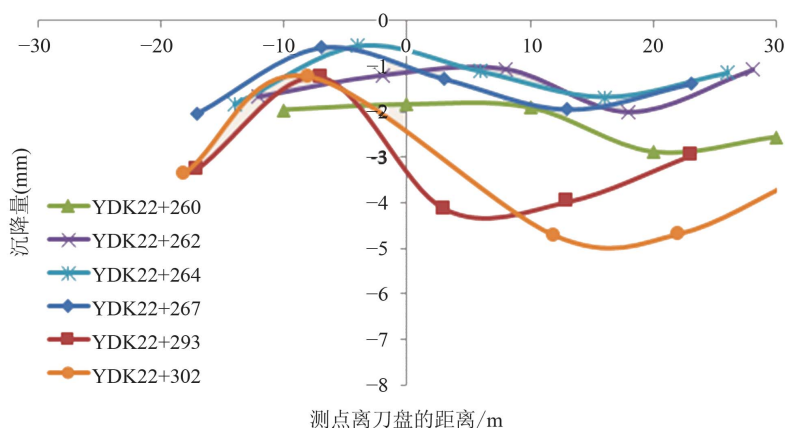


Figure 5. Vertical distribution of surface subsidence curves
图 5. 地表沉降纵向分布曲线

5. 预测模型

施工期的地表沉降分为沿掘进方向的纵向沉降以及垂直掘进方向的横向沉降。其中某个点的沉降值最终以该处所处的沉降槽来表示。因此施工期的地表沉降主要是以沿掘进方向刀盘前 25 m 到刀盘后 25 m 距离间，任意横向沉降槽的沉降曲线及方程。

根据 Peck 公式，要想求得某点的沉降预测值，需要知道该点所处断面的最大沉降值 S_y 以及沉降槽宽度系数 i_y 。

5.1. 纵向沉降值 S_y

盾构施工引起的地表沉降是由多种原因综合作用而成，包括地质情况、盾构机掘进参数，刘建航的地表沉降预测公式也是考虑土体、盾构机外径等并没有对千斤顶总推力、掘进速度、出土量、注浆量等因素进行分析，它是多种因素综合作用的结果，因此对刀盘前后方的预测难度较大。本文中利用施工时采集的 5 个纵向地表沉降监测值来进行预测，准确率较高。

施工时的地表沉降纵向断面监测值采用的方法是沿隧道掘进方向的轴线上，每隔 10 m 布设一个监测点，刀盘前后通常有 5 组监测点，即有 5 组数据。本文利用施工时采集的若干点实测值，利用拉格朗日插值法对刀盘前后的纵向地表沉降进行拟合，得到地表纵向最大沉降的预测值。

为了构造通过 $n + 1$ 个互异点上的次数不超过 n 的插值多项式 $S_n(y)$ ，可以设想将插值多项式 $S_n(y)$ 表示成 $n+1$ 个 n 次多项式的线性组合，即

$$S_n(y) = \beta_0 \omega_0(y) + \beta_1 \omega_1(y) + \dots + \beta_n \omega_n(y) = \sum_{i=0}^n \beta_i \omega_i(y) \tag{6}$$

其中

$$\omega_i(y) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n (y - y_j) \tag{7}$$

为 n 次多项式。将式(7)代入式(6)后得到

$$S_n(y) = \sum_{i=0}^n \beta_i \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n (y - y_j) \tag{8}$$

将给定的条件 $S_n(y_i) = f(y_i), i = 0, 1, \dots, n$ 代入式(8)后得到：

$$\beta_i \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n (y - y_j) = f(y_i)$$

从中可以解出 β_i

$$\beta_i = f(x_i) \frac{1}{\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n (y - y_j)} \tag{9}$$

最后将式(9)代入式(8)后得到：

$$S_n(y) = \sum_{i=0}^n f(x_i) \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \left(\frac{x - x_j}{x_i - x_j} \right) \tag{10}$$

式(10)为构造的监测数据拟合多项式，利用已知监测数据可以得到该区间范围内任意点的测值。

5.2. 横向沉降槽宽度系数 i_y

盾构施工引起的地表沉降槽宽度并不是一成不变的，而是随着盾构掘进不断变化的，表现为刀盘前无穷远处 $i = 0$ ，越靠近刀盘越大，然后刀盘通过后趋于稳定。

下表 4 统计了某盾构区间离刀盘不同距离的断面沉降值。

Table 4. Sections settlement data
表 4. 断面沉降数据

距刀盘距离 /m	Z ₀ 沉降值 /mm	M 沉降值 /mm	Y ₀ 沉降值 /mm	Y ₁ 沉降值 /mm
10	-1.1	-0.9	-0.7	-0.1
6	-1.2	-1.3	-0.6	-0.2
5	-1.1	-1.3	-0.5	-0.5
35	0.6	1.0	0.9	0.7
19	-1.3	-1.0	-0.6	-0.2
1	-0.7	-2.6	-0.1	-0.2
12	-1.5	-3.5	-0.1	-0.2
-18	1.8	-1.9	1.2	0.4
-10	2.2	-1.4	1.5	0.7
-9	2.4	-1.5	1.5	0.7
20	-0.6	-2.5	0.5	0.2
28	-1.1	-2.3	0.2	-0.1
-2	2.3	-1.5	1.3	0.2
-21	-0.2	1.3	-0.1	0.4
9	2.8	-0.8	1.6	0.4

采用线性回归方法得出这些断面的宽度系数，具体如下表 5 所示。

基于表 5 的数据做散点图 6，观察沉降槽宽度系数与断面到刀盘距离的关系。

由表可知，在 25 m 外沉降槽宽度为 0，从 -25 m 到刀盘逐渐增大，大约在刀盘前 L (L 恰好等于盾构机长度) 处时，趋于稳定，该曲线类似于对数函数曲线。

假设该曲线服从 $i_y = a \ln(L' + y) + b$ 的函数，现在对曲线进行拟合。 L' 表示刀盘前方距刀盘 L' 处的沉降槽宽度为 0，即此处地面不发生沉降或者隆起。

此处 $L' = 25$ m。则原函数变为：

$$i_y = a \ln(25 + y) + b \quad (11)$$

由于函数形式为非线性，为了便于回归，以 $\ln(25 + x)$ 为回归自变量，将函数转换为线性。故回归模型为：

$$i_y = \hat{a} \ln(25 + y) + \hat{b} \quad (12)$$

对表 5 进行数据转换如下表 6 所示。

对其进行一元线性回归得， $\hat{a} = 2.5678$ ， $\hat{b} = 1.5639$ ，可知该区域内沉降槽的宽度系数曲线为：

$$y = 2.5678 \ln(25 + y) + 1.5639 \quad (13)$$

在实际工程中，往往不能直接收集到沉降槽的宽度系数，而是通过 Peck 进行估算，因此本研究中考考虑沿轴线方向变化的沉降槽宽度系数 i 与修正后 Peck 公式^[2]得到宽度系数 i' 之间的关系。因此需要对 i 进

行数据转换(表 7)。

得到回归方程为：

$$i_y / i = 0.1975 \ln(25 + y) + 0.1203 \quad (14)$$

利用修正后 Peck 公式^[2]参数 i 得出沿隧道掘进方向 i 与 y 的变化规律：

$$i_y = \frac{H + R}{\sqrt{2\pi} \cdot \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)} \cdot \beta \cdot 0.1975 \ln(25 + y) + 0.1203 \quad (15)$$

5.3. 预测模型

根据 4.1、4.2 小节得出的纵向地表沉降规律计算方法与沉降槽宽度系数计算公式，采用修正后的 Peck 公式^[2]得出刀盘前 25 m 到后方 25 m 的地表沉降计算公式。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{\text{盾构}}(x, y) = S_n(y) \exp\left(\frac{-x^2}{2i_y^2}\right) \\ i_y = \frac{H + R}{\sqrt{2\pi} \cdot \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)} \cdot \beta \cdot 0.1975 \ln(25 + y) + 0.1203 \\ S_n(y) = \sum_{i=0}^n f(y_i) \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{(y - y_j)}{(y_i - y_j)} \end{array} \right. \quad (16)$$

式中：

Table 5. Settlement trough width coefficient data tables section of the cutter distance
表 5. 沉降槽宽度系数与断面到刀盘距离的数据统计表

Y/(m)	10	6	5	19	1	12	-18	-10	-9	-19	-16	-2	-21
i_y /(m)	9.62	10.48	12.8	10.78	9.05	8.06	8.64	11.18	9.25	5.06	8.24	9.75	2.37

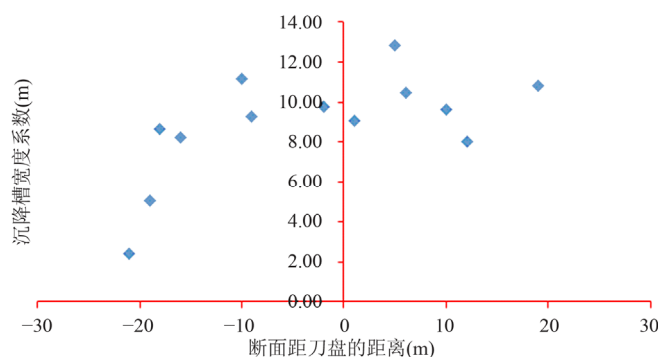


Figure 6. Sectional distance from the cutter groove width and sedimentation coefficient scatterplot
图 6. 断面距刀盘距离与沉降槽宽度系数散点图

$S_n(y)$ ——为盾构隧道轴线上方的地表沉降, mm;
 i_y ——为盾构隧道断面面的沉降槽宽度系数, m;
 H ——覆土厚度, m;
 R ——隧道半径, m;
 ϕ ——土体内摩擦角, 度;
 x ——测点距离隧道轴线的距离, m;
 y ——隧道轴线上方测点距刀盘的距离, 前方为负, m;
 α ——地表最大沉降值修正系数;
 β ——沉降槽宽度修正系数。

将该模型嵌入信息系统, 参建各方可实时查看刀盘附近的沉降曲线, 如图 7、图 8 所示。

根据该预测曲线, 可以查看影响范围内的管线、建筑物沉降值是否超过预警值, 从而提醒施工单位采取措施, 避免发生事故。

5.4. 实际应用

2011 年 9 月, 广州地铁安全预警与应急平台正式上线, 广州地铁实现了监测数据的信息化处理。2013 年 3 月, 盾构施工引起的地表沉降预测模型接入系统,

Table 6. Regression data conversion table
表 6. 回归数据转换表

序号	Y/(m)	ln(25+y)	i_y /(m)
1	10	3.5553	9.62
2	6	3.4340	10.48
3	5	3.4012	12.80
4	19	3.7842	10.78
5	1	3.2581	9.05
6	12	3.6109	8.06
7	-18	1.9459	8.64
8	-10	2.7081	11.18
9	-9	2.7726	9.25
10	-19	1.7918	5.06
11	-16	2.1972	8.24
12	-2	3.1355	9.75
13	-21	1.3863	2.37

Table 7. Regression coefficient conversion table
表 7. 回归系数转换表

序号	y/m	ln(25+y)	i_y /m	i_y/i
1	10	3.5553	9.62	0.7402
2	6	3.4340	10.48	0.8064
3	5	3.4012	12.80	0.9846
4	19	3.7842	10.78	0.8292
5	1	3.2581	9.05	0.6962
6	12	3.6109	8.06	0.6200
7	-18	1.9459	8.64	0.6646
8	-10	2.7081	11.18	0.8600
9	-9	2.7726	9.25	0.7115
10	-19	1.7918	5.06	0.3892
11	-16	2.1972	8.24	0.6338
12	-2	3.1355	9.75	0.7500
13	-21	1.3863	2.37	0.1826

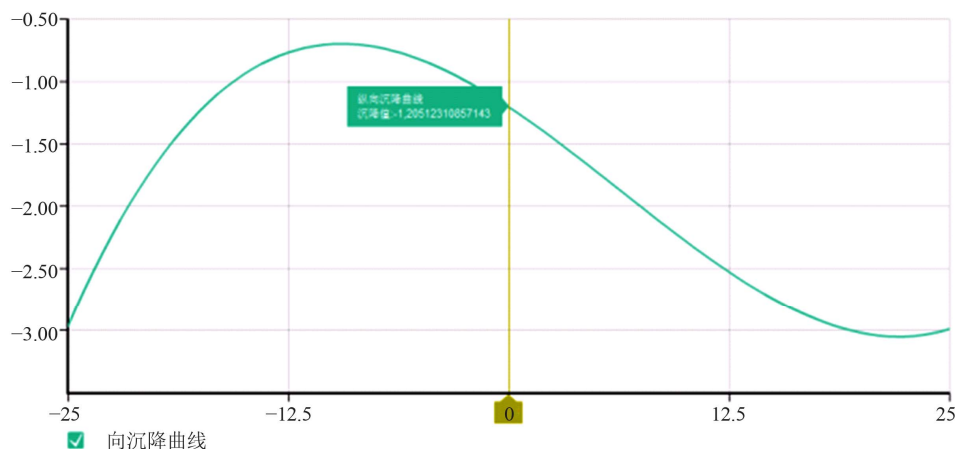


Figure 7. Surface subsidence near the maximum cutterhead
图 7. 刀盘附近的地表沉降最大值

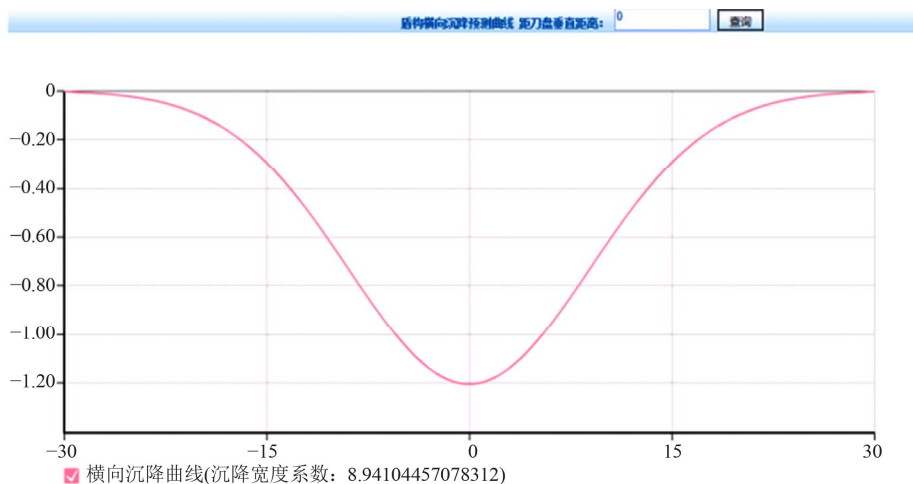


Figure 8. Cutter distance from 0 m lateral surface subsidence predictive value
图 8. 距刀盘距离为 0m 的地表横向沉降预测值

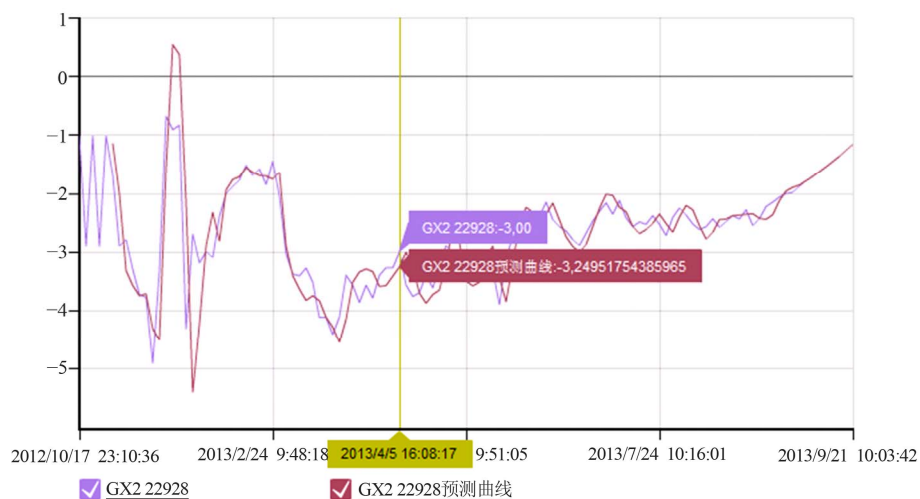


Figure 9. Predicted curve with the measured curve comparison analysis chart
图 9. 预测曲线与实测曲线对比分析图

实现了实测数据与预测数据的对比分析，有效的防止错误数据的上报。以某盾构区间管线沉降监测为例：2013年4月5日16:08时，测点GX2+22928的实测数据为-3.0 mm，预测数据为-3.2495 mm，误差为8.3%，如图9所示。

比较不同时间该点的误差值，如表8所示。

结合图9与表8进行分析可知，当监测数据不出现极值时，相对误差在10%以内；当监测数据出现极大值或极小值时，该时间附近的预测值误差较大。

产生此现象的原因主要有：

1) 该预测模型是基于PECK公式的修正公式，是用大量监测数据分析而来，与实际工程各影响因素相关性并不高；

Table 8. Error analysis table
表 8. 误差分析表

测点名称	监测时间	实测值/mm	预测值/mm	绝对误差	相对误差
GX2 + 22928	2013/3/27	-3.56	-3.28	0.28	7.87%
	2013/4/1	-3.26	-3.57	0.31	9.51%
	2013/4/5	-3.00	-3.25	0.25	8.32%
	2013/5/22	-2.74	-2.50	0.24	8.83%

2) 盾构机各项掘进参数对地表沉降影响较大，而该模型并未考虑该因素；

3) 盾构机掘进所遇到的地质情况是不断变化的，而地质情况也是影响地表沉降的主要因素之一；

4) 该模型为其他学者提供一种新型的基于信息

系统的预测方法，模型本身仍需完善。

6. 结论

本文通过对地铁盾构施工引起的地表沉降预测研究得出如下结论：

1) 刀盘前的地表横断面沉降与刀盘上方的地表横断面沉降基本服从 Peck 公式曲线，因此可以用 Peck 公式来预测刀盘前后任意位置横断面的沉降。

2) 根据实测数据将盾构法施工时刀盘附近的断面沉降曲线进行拟合发现盾构掘进时刀盘前 20 m 与刀盘后 25~30 m 沉降波动较大。其中刀盘前 20 m 到刀盘前 8~9 m 地表呈相对隆起状态；9 m 至带盘后 15 m~20 m 附近为沉降发生较大阶段，曲线斜率较大；刀盘后 15 m~30 m 为沉降的稳定阶段，曲线斜率较小。

3) 通过对工程实测数据的回归发现，沉降槽宽度系数在施工期并不是一成不变的，随着距离刀盘位置的改变而不断变化，越接近刀盘沉降槽宽度不断增加，待盾尾通过后趋于稳定，总体呈对数曲线分布。

4) 通过刀盘前后对沉降槽宽度系数变化规律与

纵向沉降值变化规律的研究得到了刀盘前 25 米到刀盘后 25 米范围内的地表沉降预测模型 $S_{\text{盾构}}(x, y)$ ，将该模型应用到信息系统中，使预测结果更为直观，有利于工程实际应用。

希望本文的研究结果可为以后类似的盾构法施工地铁对地表沉降规律研究提供一定的借鉴和参考。

参考文献 (References)

- [1] 李鹏飞 (2013) 地铁盾构施工引起的地表沉降预警预测研究. 硕士论文, 重庆交通大学, 重庆.
- [2] Peck, R.B. (1969) Deep excavation and tunneling in soft ground, State of the art report. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City.
- [3] 张厚美 (2010) 盾构隧道的理论研究与施工实践. 中国建筑工业出版社出版, 北京.
- [4] 闫海生 (2011) 典型地质条件下地铁施工引起地表沉降规律的研究. 硕士论文, 太原理工大学, 太原.
- [5] 刘志峰, 隆文武 (2012) 盾构隧道施工地表横纵向沉降变形分析. *广东土木与建筑*, 3, 64-67.
- [6] 刘昌 (2007) 盾构施工引起地表沉降的研究. 硕士论文, 西安建筑科技大学, 西安.