

# 地铁盾构施工引起的地表沉降预测<sup>\*</sup>

麻凤海, 赵阳豪

(大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

**摘要:**以长春地铁大量施工监测数据为基础, 运用 Peck 理论公式, 在公式中添加了地表最大沉降修正系数  $\alpha$  和沉降槽宽度修正系数  $\beta$ , 确定了适用于长春地区的修正系数取值范围, 并利用修正后的 Peck 公式对横向地表沉降进行预测。对比实测数据分析表明: 当  $\alpha$  取 0.6 ~ 0.9、 $\beta$  取 0.5 ~ 0.9 时, Peck 预测修正曲线和实测数据误差较小, 适用于长春地铁工程实践, 能较好地预防地铁施工事故的发生。

**关键词:**长春地铁; Peck 公式; 修正系数; 地表沉降

**中图分类号:** U45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)01-0010-05

## 0 引言

地铁隧道盾构开挖引起土体应力的重新分布, 产生地表沉降, 对周围建(构)筑物、地下管线等势必造成一定的损害, 严重时会出现坍塌、变形等现象。因此, 在地铁隧道施工前期, 对地表变形进行准确的预测很有必要。Peck 在对大量实测数据进行分析研究的基础上, 于 1969 年提出了估算开挖隧道地表沉降的预测公式, 即 Peck 公式(潘海泽等, 2010), 该公式已成为目前应用最为广泛的方法。但是, 由于地域差异性引起的地质条件的差别会对预测值的准确性产生较大的影响, Peck 公式只是基于某一地区的研究, 因此, 误差不可避免。本文基于长春地铁的实测数据和地质情况, 以 Peck 公式为基础, 进行回归分析, 得到回归拟合后的沉降曲线, 并对 Peck 公式进行修正, 研究其在长春地区的适用性, 并指导工程实践, 预防地铁施工事故的发生。

## 1 工程概况

长春地铁二号线文化广场—解放大路区间(简称 WJ)工程, 起讫里程为 K20+730.976 ~ K21+862.843, 区间全长 1 385.443 m。本文选取测点 AWDBY-WJ-940 所处区段, 埋深 12.6 m,

线间距 13 m, 采用单洞单线盾构施工。监测点布置情况如图 1 所示。

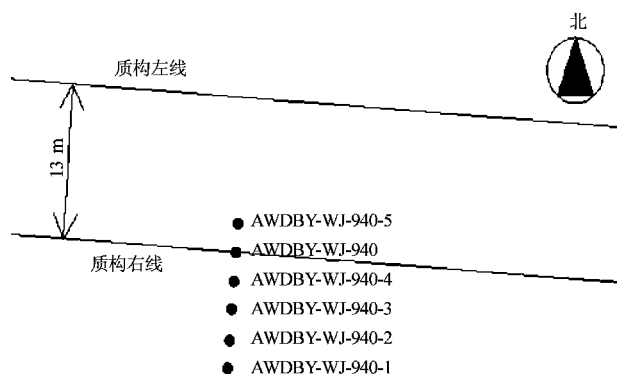


图 1 监测点布置图

Fig. 1 The layout of monitoring points

## 2 Peck 理论公式

1969 年, Peck 在搜集大量地表沉降观测数据的基础上, 对这些数据进行了详尽的分析, 从而提出地表沉降槽近似符合正态分布曲线的理论学说(陈军等, 2005): 地面沉降槽的体积等于隧道施工中地层损失的体积, 而且假设施工横断面上地面沉降曲线(图 2)的形状和正态分布曲线的形状是一样的(宋克志等, 2004)。根据这个理论, Peck 提出了地表沉降的预测公式:

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-11-16.

**基金项目:** 国家自然科学基金——强震下煤矿采动区岩层动力失稳与建筑安全控制研究(51474045)和基于信息可视化新技术进行矿山开采沉陷演化研究(51174038)联合资助。

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

$$S_{\max} = \frac{V_1}{\sqrt{2\pi}i} \approx \frac{V_1}{2.5i}. \quad (2)$$

式中,  $S_x$  是距离隧道中心线横向距离  $x$  处的地表沉降值 (单位: mm);  $x$  是距离隧道中心线的水平横向距离 (单位: m);  $S_{\max}$  是地表的沉降最大值 (单位: mm);  $V_1$  是盾构隧道单位长度的地层损失量 (单位:  $\text{m}^3/\text{m}$ );  $i$  是沉降槽的宽度。依据 Reilly 和 New (1982) 在英国伦敦地区的工程经验, 沉降槽的宽度  $i$  和隧道的深度  $h$  之间存在以下线性关系 (韩焱, 李宁, 2007):

$$i = Kh. \quad (3)$$

式中,  $K$  是沉降槽的宽度系数, 主要取决于土体自身的物理性质。根据英国伦敦地区的工程实践经验 (韩焱等, 2007): 对于无粘性土,  $K$  取 0.2 ~ 0.3; 对于硬粘土,  $K$  取 0.4 ~ 0.5; 对于软的粉质粘土,  $K$  取 0.7。

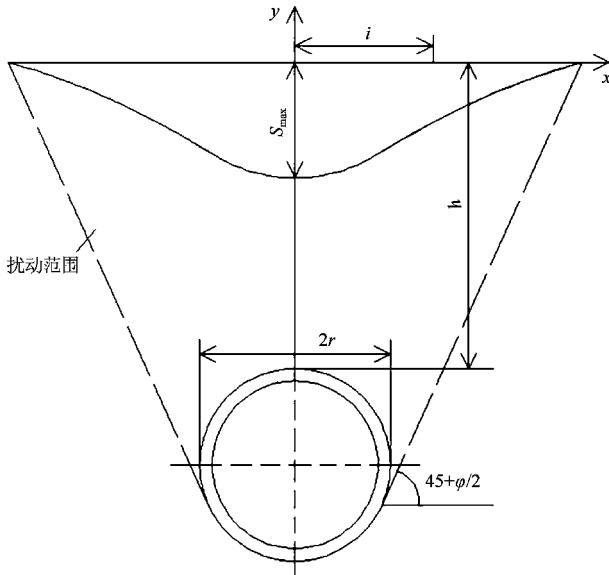


图2 地表沉降曲线

Fig. 2 The subsidence curve of the surface

图2中,  $\varphi$  为土体的内摩擦角 (单位:  $^\circ$ );  $h$  为覆盖土层的厚度 (单位: m);  $r$  为盾构半径 (单位: m)。

本文不考虑水的影响, 故地层损失与最大位移之间的关系可通过对式 (1) 积分得到:

$$S_{\max} = \frac{0.313V_1D^2}{i}. \quad (4)$$

通过上述公式计算得到距隧道中心线横向距离  $x$  处的地表沉降值, 并绘制出 Peck 预测曲线和实测数据曲线 (图3)。

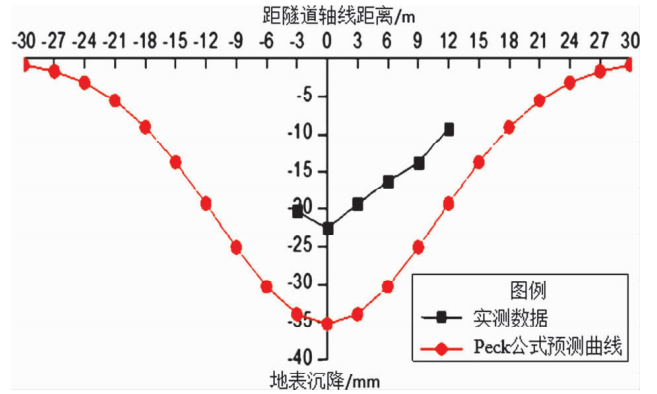


图3 预测曲线和实测数据对比

Fig. 3 Comparison of the forecast curve and real measured data

由图3可以看出, Peck 预测曲线和实测数据曲线之间存在较大的误差, 故需对 Peck 公式进行回归拟合。

### 3 Peck 理论公式回归分析

首先对原始 Peck 公式即式 (1) 进行对数运算, 得到如下公式 (严健等, 2015):

$$\ln S(x) = \ln S_{\max} + \frac{1}{i^2} + \left(-\frac{x^2}{2}\right). \quad (5)$$

将  $\ln S(x)$  和  $-x^2/2$  作为线性回归的变量, 将  $\ln S_{\max}$  作为线性回归的常数项, 将  $1/i^2$  作为线性回归的线性系数。整个回归过程如下 (胡斌等, 2012):

$$S_{xx} = \sum \left(\frac{-x_i^2}{2}\right)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum \frac{x_i^2}{2}\right)^2. \quad (6)$$

$$S_{xy} = \sum \left[ \left(\frac{-x_i^2}{2}\right) \ln S(x_i) \right] - \frac{1}{n} \sum \left(\frac{-x_i^2}{2}\right) \sum \ln S(x_i). \quad (7)$$

$$S_{yy} = \sum \ln^2 S(x_i) - \frac{1}{n} \left[ \sum \ln S(x_i) \right]^2. \quad (8)$$

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}. \quad (9)$$

$$a = \overline{\ln S(x_i)} - b \left( -\frac{x^2}{2} \right). \quad (10)$$

线性回归处理以后, 得到如下的理论公式:

$$\ln S(x) = a + b \times \left( -\frac{x^2}{2} \right). \quad (11)$$

式中,  $x_i$  为所选择的样本中第  $i$  个样本点与隧道轴线距离的代数值;  $n$  为所选择的样本点的个数;  $a$  为线性回归处理以后的常数项;  $b$  为线性回归处理以后的线性系数。

对上述公式进行计算, 可以得到线性回归后  $S_{\max}$  和  $i$  的理论计算公式:

$$S_{\max} = \exp(a). \quad (12)$$

$$i = \frac{1}{b}. \quad (13)$$

线性相关系数  $R$  是用来检验回归分析处理后得到的 Peck 理论计算公式的线性相关关系程度。线性相关系数  $R$  的计算公式如下 (姚爱军等, 2010):

$$R = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}} \times \sqrt{S_{yy}}}. \quad (14)$$

若依据上式运算得到  $R > r_{0.01}(n-2)$ , 则得出线性回归后 Peck 公式的线性相关关系高度显著;

若依据上式运算得到  $r_{0.01}(n-2) > R > r_{0.05}(n-2)$ , 则得出线性回归后 Peck 公式的线性相关关系显著。

按上述步骤计算 WJ 区间 AWDBY-WJ-940 测点的地表沉降数据, 回归分析处理以后的结果如表 1 所示。

根据表 1 中的数据, 并结合上述回归分析公式, 可计算得出:  $S_{xx} = 3\,945.38$ ,  $S_{xy} = 45.43$ ,  $S_{yy} = 0.53$ ; 再由式 (9)、(10) 计算得出:  $a = 3.05$ ,  $b = 0.011\,5$ ; 从而得到回归后的线性函数:

$$\ln S(x) = 3.05 + 0.011\,5 \times \left( -\frac{x^2}{2} \right); \text{ 由式 (12)、}$$

表 1 实测沉降数据回归分析

Tab. 1 Regression analysis of the real measured settlement data

样本点	横坐标 $x/\text{m}$	$S_x/\text{mm}$	$-x^2/2$	$\ln S(x)$
1	-3	20.29	-4.5	3.01
2	0	22.52	0	3.11
3	3	19.33	-4.5	2.96
4	6	16.26	-18	2.79
5	9	13.82	-40.5	2.63
6	12	9.22	-72	2.22

(13) 计算得出:  $S_{\max} = 21.22$ ,  $i = 9.32$ , 进而可以绘制拟合后的 Peck 曲线, 并将其与地表沉降实测数据和 Peck 预测曲线对比 (图 4)。

线性相关系数由式 (14) 计算得到:  $R = 0.990 > r_{0.01}(4) = 0.917$ , 由此判断回归函数线性相关关系高度显著。

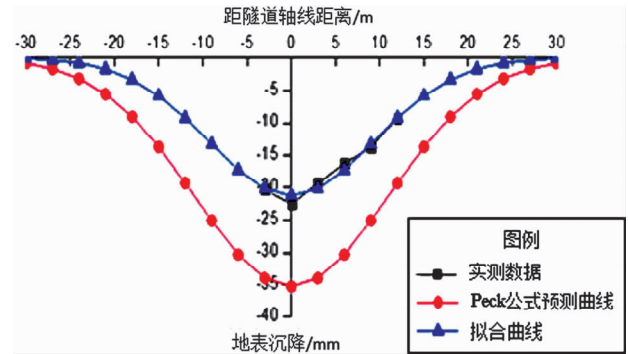


图 4 实测数据、预测曲线和拟合曲线对比

Fig. 4 Comparison of the real measured data, forecast curve and fitting curve

由图 4 可以看出, 拟合后的曲线与实测数据基本吻合, 能够较好地反映地表沉降的实际概况, 可以用于地表沉降预测。但 Peck 公式预测曲线与实测数据、拟合曲线存在比较大的数值偏差, 有必要对 Peck 理论公式进行修正。

## 4 Peck 理论公式修正

依据上述的理论分析, 运用 Peck 理论公式, 在公式中添加两个修正系数  $\alpha$  和  $\beta$ , 得到如下的修正公式 (段绍伟等, 2015):

$$S(x) = \alpha S'_{\max} \exp \left( \frac{-x^2}{2(\beta i')^2} \right). \quad (15)$$

式中， $\alpha$  为地表最大沉降修正系数； $\beta$  为沉降槽宽度系数修正系数； $S'_{\max}$  为 Peck 理论公式原始预测的地表沉降最大值（单位：mm）； $i'$  为 Peck 理论公式原始预测的沉降槽宽度系数（单位：m）。

转换为线性函数：

$$\ln S(x) = \ln(\alpha S'_{\max}) + \frac{1}{(\beta i')^2} \times \left(-\frac{x^2}{2}\right). \quad (16)$$

以  $\ln(\alpha S'_{\max})$  为回归分析后的常数项，以  $\frac{1}{(\beta i')^2}$  为回归分析后的线性系数进行回归处理（郭延华，吴龙海，2013），可得到两个修正系数的计算公式： $\alpha = \frac{\exp(a)}{S'_{\max}}$ ， $\beta = \frac{1}{i'/b}$ 。根据已求解的  $S'_{\max}$  和  $i'$  计算得： $\alpha = 0.60$ ， $\beta = 0.85$ 。选择不同的工作截面可以计算出不同的修正系数，对大量的工作断面进行参数分析，可以得出长春地区地铁盾构施工断面修正系数的分布特点。

表 2 修正系数分布  
Tab. 2 Distribution of correction coefficient

分布区间	$\alpha$		$\beta$	
	样本数	分布率(%)	样本数	分布率(%)
0.3~0.4	1	2	0	0
0.4~0.5	2	4	3	6
0.5~0.6	5	10	11	22
0.6~0.7	13	26	10	20
0.7~0.8	15	30	9	18
0.8~0.9	12	24	11	22
0.9~1.0	2	4	6	12

由表 2 可以看出，当地表最大沉降修正系数  $\alpha$  位于 0.6~0.9 之间时，占 80%；当沉降槽宽度系数  $\beta$  位于 0.5~0.9 之间时，占 82%。结合图 4 的分析结果，不难得出，修正后选取的  $\alpha$ 、 $\beta$  值能够更加准确地进行 Peck 理论公式的地标沉降预测。

将  $\alpha$ 、 $\beta$  的下限值和上限值分别作为修正系数运用于两个典型的区间工程（WJ 区间和自由大路—南湖大路区间（简称 ZN），同时，将得到的 Peck 公式预测曲线（简称上限曲线和下限曲线）与实测数据进行对比。

由图 5 可以看出，绝大多数实测数据位于上限曲线和下限曲线之间，极个别实测数据位于下限曲线之下，少量实测数据位于上限曲线之上。因

此，可以将修正后的 Peck 公式用来预测地表沉降，其预测效果明显优于原预测曲线。

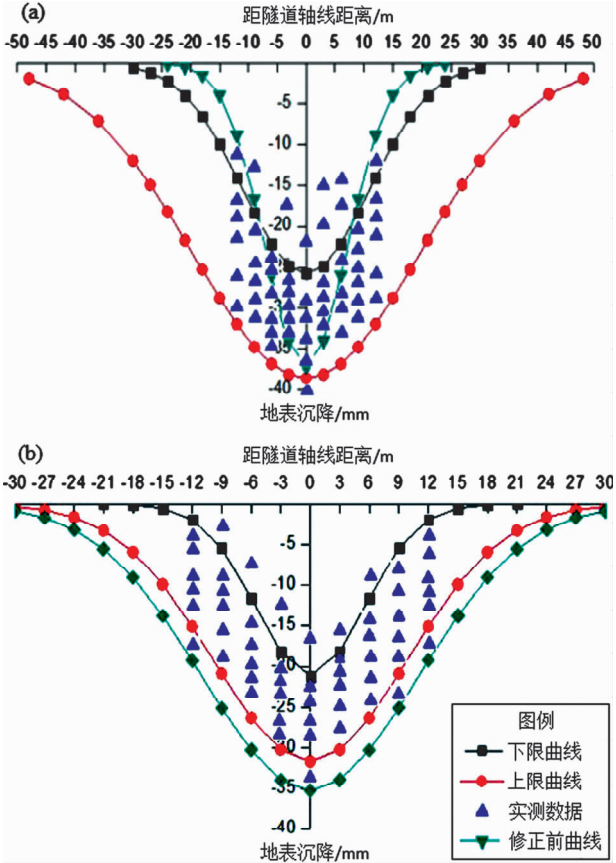


图 5 WJ (a)、ZN (b) 区间沉降曲线对比  
Fig. 5 Comparison of settlement curve in WJ (a) and ZN (b) intervals

5 结论

本文以长春地铁的施工监测数据为基础，利用修正的 Peck 公式对地表沉降进行预测，得出以下结论：

(1) 运用 Peck 理论公式，结合长春地铁的工程地质和水文地质概况，计算得出了地铁盾构开挖地表沉降的最大理论值，并且，工程实测的数据显示其地表沉降的横向分布近似为一条正态分布曲线。

(2) 当地表的最大沉降修正系数  $\alpha$  位于 0.6~0.9 之间，沉降槽的宽度系数  $\beta$  位于 0.5~0.9 之间时，计算得到的 Peck 理论公式修正曲线与工程实测数据曲线相对吻合，其预测的效果明显比原始 Peck 理论公式预测曲线的准确程度高，更能反

映地表沉降的变化趋势。

(3) 充分说明了可以将 Peck 公式用于长春地铁施工沉降的预测, 但需要对原始公式中的地表最大沉降和沉降槽宽度进行修正, 修正以后的 Peck 公式的预测结果与实际施工沉降基本吻合, 能够很好地指导工程实践。

#### 参考文献:

- 陈军, 刘波, 陶龙光. 2005. 暗挖地铁车站引起地表沉降拟合分析与 Peck 法比较研究[J]. 岩土工程技术, 19(1): 1-4.
- 段绍伟, 黄磊, 鲍灶成等. 2015. 修正的 Peck 公式在长沙地铁隧道施工地表沉降预测中的应用[J]. 自然灾害学报, 24(1): 164-169.
- 郭延华, 吴龙海. 2013. 南京地层地铁隧道施工的 Peck 公式修正[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 30(1): 41-44.
- 韩焯, 李宁, Stangding J R. 2007. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 28(1): 23-35.
- 韩焯, 李宁. 2007. 隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 26(3): 594-600.
- 胡斌, 莫云, 胡新丽等. 2012. Peck 法在武汉地铁隧道地表沉降预测中的适用性分析[J]. 工程勘察, (7): 6-10.
- 潘海泽, 蒋冰玉, 黄涛. 2010. Peck 公式在天津隧道盾构施工地面沉降预测中的适用性分析[J]. 测绘科学, 35(3): 53-55.
- 宋克志, 王梦恕, 孙谋. 2004. 基于 Peck 公式的盾构隧道地表沉降的可靠性分析[J]. 北方交通大学学报, 28(4): 30-33.
- 严健, 何川, 吴海等. 2015. 基于 Peck 公式的藏区公路隧道施工地面沉降预测[J]. 公路交通科技, 32(1): 110-115.
- 姚爱军, 赵强, 管江等. 2010. 基于北京地层地铁隧道施工的 Peck 公式的改进[J]. 地下空间与工程学报, 6(4): 789-793.
- O'Reilly M P, New B M. 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction [C]//Proc. Tunnelling 82. Institution of Mining and Metallurgy, London, 173-181.

## Study on Prediction of Ground Surface Settlement Caused by Subway Shied Tunneling Construction

MA Fenghai, ZHAO Yanghao

(College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

#### Abstract

Based on a large number of construction measured data of Changchun Subway, we introduce the maximum surface subsidence correction coefficient  $\alpha$  and the width of the settlement trough correction factor  $\beta$  to correct Gaussian equation which was used to calculate the lateral surface subsidence, and determine the range of the correction coefficient. The analyzing results of comparing the real measured data show that: When  $\alpha$  is 0.6~0.9,  $\beta$  is 0.5~0.9, the error between Peck forecast correction curve and the real measured data is small. The correction formula can be better applied to the subway engineering in Changchun and prevent the happening of the subway accident.

**Key words:** subway in Changchun; Peck Gaussian equation; correction factor; ground surface settlement