

软土地区盾构隧道掘进引起的地表沉降预测修订

杨 芬¹, 王冠琼², 刘干斌^{1*}, 叶俊能²

(1. 宁波大学 岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市轨道交通工程建设指挥部, 浙江 宁波 315012)

摘要: 在盾构隧道施工时, 地表沉降的 Peck 公式预测结果往往因地质条件的不同而与实测结果差异较大. 为此研究基于宁波轨道交通 1 号线地表沉降实测数据, 利用最小二乘和一元线性回归法, 确定了盾构隧道地表沉降槽宽度系数 K 和地层损失率 V_l 的取值范围, 并引入了地表最大沉降修订系数 α 和沉降槽宽度修订系数 β 对 Peck 公式进行修订. 结果表明: 宁波软土盾构隧道地表沉降槽宽度系数 K 范围为 0.6~0.9, 建议取 0.75, 地层损失率 V_l 范围为 1%~3%, 建议取 2%; 当修订系数 α 取 1.2, β 取 0.8 时, 能够获得比 Peck 公式更好的预测效果.

关键词: 盾构隧道; 地表沉降; Peck 公式; 回归分析; 修订系数

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2016) 01-0113-05

盾构隧道施工对土层的扰动不可避免, 进而引起地表沉降和地层移动, 对周边和埋在土层中的建筑物、构筑物、管线、既有隧道等结构产生不利影响. 因此, 合理预测地表的变形规律十分重要. 1969 年, Peck^[1]对大量隧道施工引起的地面沉降实测数据进行了分析, 提出了地表沉降分布的预测公式, 即 Peck 公式, 该公式已广泛应用于地铁隧道施工中.

目前一些学者对 Peck 公式在不同地区的适用性做了研究, 在 Peck 理论上对沉降预测公式进行了修订、拓展和完善. 姚爱军等^[2]对北京地区盾构开挖的大量实测数据进行了分析, 发现原始 Peck 公式并不能很准确地描述地表沉降规律, 因此引入地表最大沉降 $S_{\max}$ 的修订系数 α 和沉降槽宽度 i 的修订系数 β 对 Peck 公式进行修订, 并确定了适用于北京当地的 α 和 β 取值范围. 胡斌等^[3]根据最小二乘法原理和线性回归方程对武汉地区某一区间的横向地表沉降实测值进行了 Peck 曲线拟合, 证明隧道埋深 Z_0 与沉降槽宽度 i 符合公式 $i=KZ_0$, 并给出沉降槽宽度系数 K 的取值范围. 潘海泽等^[4]根据天津某盾构区间工程的实际观测数据, 分析了地表沉降的横向和纵向变化规律, 确定适合当

地的修订参数取值范围, 并得出符合当地的 Peck 公式. 冯晓光等^[5]根据西安黄土地区某区间段盾构施工实测数据, 通过对沉降槽宽度系数 K 和地层土体损失率 η 的修订, 得到适用于黄土地区的修订 Peck 公式. 杨清源等^[6]根据大连地区地铁隧道开挖大量地表沉降实测数据, 运用数学方法在 Peck 公式中引入修订系数使之适用于大连地质条件.

由于各地区工程地质、水文地质、隧道施工技术等的差异, Peck 公式的预测结果往往与实测数据不符, 需要进行修订. 为此, 本文利用宁波轨道交通 1 号线的盾构隧道施工引起的地表沉降实测数据, 采用最小二乘法对实测数据进行一元线性回归拟合, 对 Peck 公式参数进行修订, 并评价了修订后 Peck 公式在宁波海相沉积软土中的适用性.

1 Peck 公式

基于地层损失理论, 对地表沉降槽的实测数据进行统计归纳分析. Peck 认为在不排水的土层中盾构施工引起地表沉降槽的体积应该等于地层损失的体积, 得到地面横向沉降槽的估算公式^[1]:

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

收稿日期: 2014-09-05.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市科技计划项目 (2013C50005); 浙江省中青年学科带头人学术攀登项目 (pd2013096).

第一作者: 杨芬 (1990-), 女, 浙江丽水人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 软土地下工程. E-mail: 790147849@qq.com

*通信作者: 刘干斌 (1976-), 男, 江西吉安人, 博士/教授, 主要研究方向: 软土地下工程. E-mail: Liugb76@163.com

$$S_{\max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} = \frac{\pi R^2 V_l}{i\sqrt{2\pi}}, \quad (2)$$

式中: x 为测点距离隧道轴线的横向水平距离; $S(x)$ 为距离隧道中心轴线 x 处地表沉降值; $S_{\max}$ 为隧道轴线处地表最大沉降值; i 为地表沉降槽宽度, 即沉降槽拐点到隧道轴线的距离; V_s 为单位长度土体地层损失; V_l 为土体损失率; R 为隧道外半径。

1986 年 Attewell 等^[7]总结对隧道开挖引起的地表沉降预测的一些经验方法, 得到 i 与隧道埋深 Z_0 存在以下线性关系:

$$i = KZ_0, \quad (3)$$

式中: K 为沉降槽宽度系数。

根据地层损失和地层损失率计算公式:

$$\begin{aligned} V_s &= \sqrt{2\pi} i S_{\max}, \\ V_l &= \frac{V_s}{A} = \frac{\sqrt{2\pi} i S_{\max}}{\pi R^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

得到 Peck 沉降预测公式为:

$$\begin{aligned} S(x) &= \frac{V_l A}{\sqrt{2\pi} i} \exp\left[\frac{-x^2}{2i^2}\right] = \\ &= \frac{V_l \pi R^2}{\sqrt{2\pi} K Z_0} \exp\left[\frac{-x^2}{2K^2 Z_0^2}\right]. \end{aligned} \quad (5)$$

2 地表沉降数据统计

2.1 Peck 公式线性回归

通过对宁波轨道交通 1 号线盾构区间沉降实测数据分析, 发现地表沉降曲线形态类似正态分布。由于每一监测点地表沉降值与其距隧道轴线距离存在一一对应关系, 因此在 Peck 公式的基础上, 可采用最小二乘法对实测数据进行一元线性回归拟合^[8]。

首先对 Peck 公式进行变换, 对(1)式两边取对数, 得到:

$$\ln S(x) = \ln S_{\max} - \frac{1}{i^2} \times \frac{x^2}{2}, \quad (6)$$

令

$$\hat{a} = \ln S_{\max}, \quad \hat{b} = \frac{1}{i^2}, \quad \hat{y} = \ln S(x), \quad (7)$$

式中: $\hat{a}$ 为回归常数, $\hat{b}$ 为回归系数, $\hat{y}$ 为 $\ln S(x)$ 回归后的值。

(6)式可转化为:

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b} \times \left(-\frac{x^2}{2}\right). \quad (8)$$

以 $\ln S(x)$ 和 $-x^2/2$ 为回归变量进行分析, 采用最小二乘法进行回归拟合, 回归过程如下:

$$\begin{aligned} L_{xx} &= \sum_{i=1}^n \left(-\frac{x_i^2}{2}\right)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{2}\right)^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n \left[\left(-\frac{x_i^2}{2}\right) - \overline{\left(-\frac{x^2}{2}\right)} \right]^2, \end{aligned} \quad (9)$$

$$L_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} L_{xy} &= \sum_{i=1}^n \left(-\frac{x_i^2}{2}\right) y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(-\frac{x_i^2}{2}\right) \sum_{i=1}^n y_i = \\ &= \sum_{i=1}^n \left[\left(-\frac{x_i^2}{2}\right) - \overline{\left(-\frac{x^2}{2}\right)} \right] (y_i - \bar{y}), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\hat{b} = \frac{L_{xy}}{L_{xx}}, \quad (12)$$

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{b} \overline{\left(-\frac{x_i^2}{2}\right)} = \overline{\ln S(x)} - \hat{b} \overline{\left(-\frac{x_i^2}{2}\right)}. \quad (13)$$

由(7)式得:

$$S_{\max} = \exp(\hat{a}), \quad i = \hat{b}^{(-0.5)}. \quad (14)$$

回归曲线为:

$$S(x) = \exp(\hat{a}) \exp\left(-\frac{x^2}{2} \hat{b}\right). \quad (15)$$

采用线性相关系数 R 对函数的线性相关性检验, 令

$$R = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx}} \sqrt{L_{yy}}}. \quad (16)$$

若 $R \geq r_{0.01}(n-2)$, 则认为回归方程的线性关系高度显著, 若 $r_{0.05}(n-2) \leq R \leq r_{0.01}(n-2)$, 则认为回归方程的线性关系显著。

2.2 实测数据拟合统计分析

选取 1 号线 50 个监测断面进行统计分析, 采用一元线性回归拟合实测数据, 相关程度良好。通过对 50 个监测断面最大沉降测量数据加以整理和统计, 得到沉降槽宽度 i 、最大沉降拟合值 $S_{vl, \max}$ 、最大沉降实测值 $S_{l, \max}$ 、槽宽系数 K 、地层损失率 V_l 以及拟合相关系数, 取其中 3 个断面的数据, 结果见表 1。

2.2.1 Peck 公式拟合曲线参数统计分析

对选取的地表沉降实测数据进行 Peck 曲线拟合, 得出各监测断面的沉降槽宽度系数及地层损失率的值。

表 1 断面特征参数统计

断面	最大沉降拟合 值 $S_{v1,max}/\text{mm}$	最大沉降实测 值 $S_{l,max}/\text{mm}$	沉降槽宽 度 i/m	相关系 数 R	a	b	槽宽系数 $K=i/Z_0$	地层损失 率 V_1	相关 情况
K9+395	19.087	20.21	12.809	0.905	2.949	6.094 9E-09	0.692	0.015 186 32	好
K9+550	19.356	20.93	14.037	0.969	2.963	5.075 3E-09	0.757	0.019 223 78	良好
K9+624	20.843	21.28	11.733	0.939	3.037	7.264 3E-09	0.683	0.024 056 28	好

(1)沉降槽宽度系数 K 值统计. 通过对 50 组实测地表沉降数据采用 Peck 曲线拟合, 得出沉降槽宽度系数位于 0.5~0.6 之间的约占 14%, 位于 0.6~0.7 之间的约占 34%, 位于 0.7~0.8 之间的约占 28%, 位于 0.8~0.9 之间的约占 22%, 位于 0.9~1.0 之间的约占 2%. 可知沉降槽宽度系数主要位于 0.6~0.9 之间, 约占统计总数的 84%.

(2)地层损失率 V_1 统计. 通过对 50 组实测地表沉降数据采用 Peck 曲线拟合, 得出的地层损失率 V_1 位于 0.005~0.02 之间的约占 52%, 位于 0.02~0.03 之间的约占 40%, 位于 0.03~0.04 之间的约占 8%. 其中地层损失率主要位于 0.01~0.03 之间, 约占 88%.

根据上述概率统计, 可以得到宁波轨道交通盾构隧道沉降槽宽度系数 K 范围为 0.6~0.9(建议取 0.75). 地层损失率 V_1 范围为 1%~3%(建议取 2%), 此值与上海地区较为接近.

根据已得到的 Peck 曲线预测(5)式, 可以进一步画出针对本地区的 Peck 公式预测曲线.

2.2.2 典型断面拟合曲线与实测值比较分析

表 1 中 3 个断面的最终地表沉降实测值, 沉降拟合曲线及 Peck 公式预测曲线如图 1~3 所示.

从表 1 和图 1~图 3 中可以看出, 根据实测数据

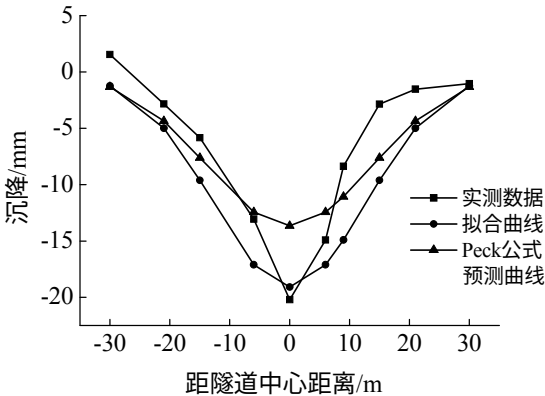


图 1 K9+395 断面处沉降拟合曲线

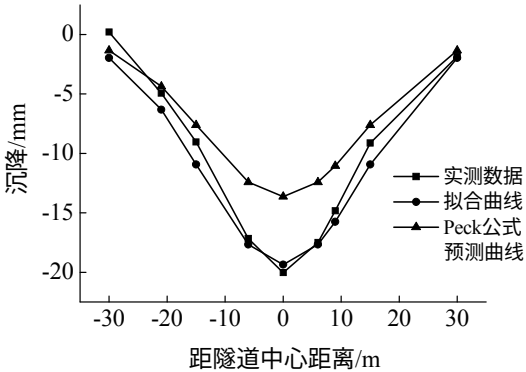


图 2 K9+550 断面处沉降拟合曲线

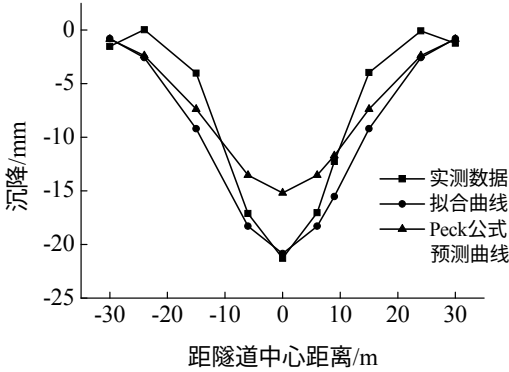


图 3 K9+624 断面处沉降拟合曲线

拟合所得拟合曲线与实测曲线形态较接近, 各测点的相关系数均达到 0.90 以上, 拟合效果较显著, 说明用 Peck 公式得到的曲线来拟合地表沉降槽是合理的. 但根据 Peck 公式预测的曲线与拟合曲线和实测曲线有较大差异. 可见, 以 $K=0.75$ 和 $V_1=0.02$ 为预测参数的 Peck 公式不能完全精确地预测地表沉降, 需要对其进行修订.

2.2.3 Peck 公式修订

Peck 公式主要由最大沉降 S_{max} 和沉降槽宽度 i 决定, 引入 S_{max} 修订系数 α 和 i 的修订系数 β . 由于隧道开挖影响因素复杂, α 和 β 为考虑各方面叠加效应后的参数. 修订后的 Peck 公式为:

$$S(x) = \alpha S_{max} \times \exp\left(-\frac{x^2}{2(\beta i)^2}\right), \quad (17)$$

式中: α 为地表最大沉降修订系数; β 为沉降槽宽度修订系数; $S_{\max}$ 为 Peck 公式预测的隧道轴线处地表最大沉降值; i 为 Peck 公式预测的沉降槽宽度。

修订 Peck 公式转换为线性函数为:

$$\ln S(x) = \ln(\alpha S_{\max}) + \left(-\frac{x^2}{2(\beta i)^2} \right), \quad (18)$$

由回归曲线(15)式可以得到:

$$\ln S(x) = \ln(\alpha S_{\max}) + \left(-\frac{x^2}{2(\beta i)^2} \right) = \hat{a} + \left(-\frac{x^2}{2} \hat{b} \right). \quad (19)$$

进一步得到:

$$\alpha = \frac{\exp(\hat{a})}{S_{\max}}, \quad \beta = \sqrt{\frac{1}{\hat{b}}} / i. \quad (20)$$

根据以上推导过程, 对相关性较显著的 50 个断面进行参数修订, 得到修订系数 α 和 β (表 2)。

表 2 修订系数分布

分布	α 分布		分布	β 分布	
区间	样本数	分布率/%	区间	样本数	分布率/%
0.2~0.4	1	2	0.7~0.8	4	8
0.4~0.6	12	24	0.8~0.9	6	12
0.6~0.8	8	16	0.9~1.0	11	22
0.8~1.0	9	18	1.0~1.1	12	24
1.0~1.2	10	20	1.1~1.2	8	16
1.2~1.4	5	10	1.2~1.3	7	14
1.4~1.6	3	6	1.3~1.4	0	0
1.6~1.8	2	4	1.4~1.5	2	4

从表 2 可以看出, 参数 α 主要位于 0.4~1.4 区间, 占总量的 88%。参数 β 主要位于 0.8~1.3 区间, 占总量的 88%。由此可得, 当沉降槽宽度系数 K 取 0.75, 地层损失率 V_1 取 0.02 时, 针对此 Peck 预测公式的地表最大沉降修订系数 α 范围为 0.4~1.4 (建议取 1.2), 沉降槽宽度修订系数 β 范围为 0.8~1.3 (建议取 0.8)。

2.2.4 修订系数适用性验证

选取 $\alpha=1.2$ 和 $\beta=0.8$ 对修订后的 Peck 公式适用性进行验证。选取 1 号线典型断面实测地表沉降数据与修订前后的 Peck 公式预测曲线进行对比, 如图 4~图 6。

从图 4~图 6 可以看出, 修订后的 Peck 公式预测曲线能够更好地与实测值吻合, 且偏于安全。因此, 针对软土, 当地质条件与施工工况等情况类似

时, 可以采用修订后的 Peck 公式预测地表沉降。当地表最大沉降修订系数 α 取 1.2, 沉降槽宽度修订系数 β 取 0.8 时, 可以获得更为准确的预测结果。但由于仅选取 1 号线部分区间实测数据分析而得到修订系数, 修订后的 Peck 预测公式适用范围具有一定的局限性。

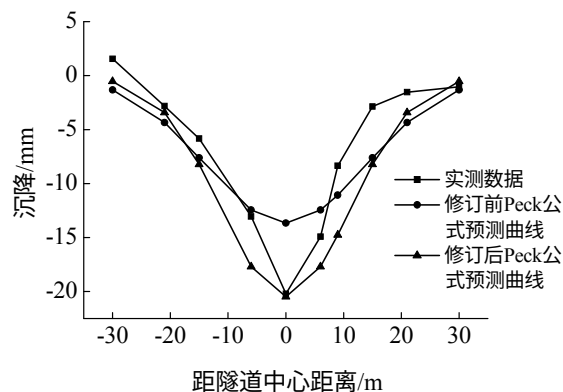


图 4 K9+395 断面修订前后预测值与实测值对比

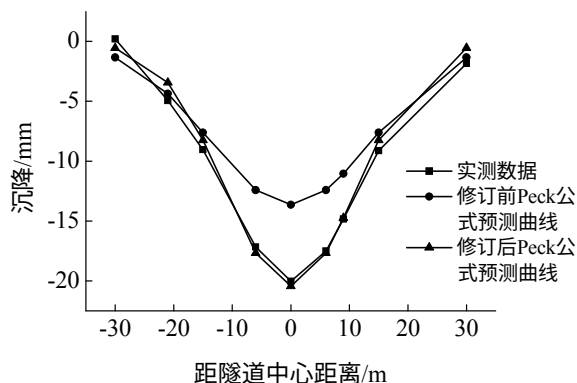


图 5 K9+550 断面修订前后预测值与实测值对比

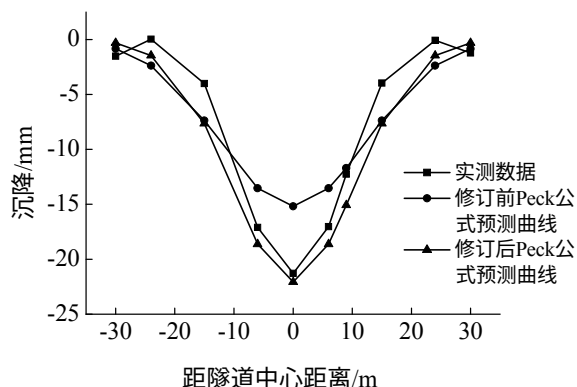


图 6 K9+624 断面修订前后预测值与实测值对比

3 结论

以轨道交通 1 号线为工程背景, 针对宁波软土

地层,利用最小二乘法和一元线性回归,确定地表沉降槽宽度系数 K 、地层损失率 V_1 初步取值范围,然后引入地表最大沉降修订系数 α 和沉降槽宽度修订系数 β 对Peck公式进行修订,主要结论如下:

(1)利用宁波轨道交通1号线50组地表沉降实测数据,确定了盾构隧道施工引起的地表沉降槽宽度系数 K 范围为0.6~0.9(建议取0.75),地层损失率 V_1 范围为1%~3%(建议取2%)。

(2)宁波软土盾构隧道施工修订Peck公式的地表最大沉降修订系数 α 范围为0.4~1.4(建议取1.2),沉降槽宽度修订系数 β 范围为0.8~1.3(建议取0.8)。当 α 取1.2, β 取0.8时,沉降预测结果与实测值吻合较好。

参考文献:

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//Petrasovits G, Mecsi J. Proceeding of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: State of the Art Volume, Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, A C, 1969:225-290.
- [2] 姚爱军,赵强,管江,等.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,2010,6(4):789-793.
- [3] 胡斌,莫云,胡新丽,等. 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,2012(7):6-10.
- [4] 潘海泽,蒋冰玉,黄涛. 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,2010,35(3):53-55.
- [5] 冯晓光,任建喜,王金华.西安黄土地层盾构施工的Peck公式修订[J].西安科技大学学报,2012,32(3):343-347.
- [6] 杨清源,麻凤海,胡国栋,等.大连地铁隧道施工的Peck公式改进[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012,31(2):159-162.
- [7] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures[M]. Glasgow: Blackie, 1986:10-50.
- [8] 盛骤,谢式千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2011:244-257.

Modifications of Ground Surface Subsidence Prediction for Shield Tunnel Construction in Soft Soil

YANG Fen¹, WANG Guan-qiong², LIU Gan-bin^{1*}, YE Jun-neng²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Urban Rail Transit Project Construction Headquarters, Ningbo 315012, China)

Abstract: In the process of constructing shield tunnels, the result of prediction with Peck formula for ground surface subsidence shows great disagreement with the result measured under different geological conditions. Therefore, based on the measured data of ground surface subsidence in Ningbo Rail Transit Line 1, the range of trough width coefficient K of the ground surface settlement and the ground loss rate V_1 of shield tunnel in soft soil of Ningbo are determined in this paper using the least square method and monadic linear regression. The coefficients of the maximum ground surface settlement α and the settlement trough width β are introduced and the Peck formula is modified. It is shown that the range of the surface settlement trough width coefficient K is between 0.6~0.9, and V_1 is between 1%~3%, and 0.75 and 2% for K and V_1 is recommended, respectively. When the value of α and β takes 1.2 and 0.8, respectively, a better prediction result can be obtained compared with the original Peck prediction formula.

Key words: shield tunnel; surface subsidence; Peck formula; regression analysis; revision coefficient

(责任编辑 史小丽)