

文章编号:1671-6833(2025)01-0075-07

洛阳盾构隧道地表沉降 Peck 公式参数修正

郜新军, 魏文宇, 李珊珊, 苏庆辉

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:为准确预测洛阳粉质黏土与砂卵石复合地层中的盾构隧道地表沉降量,采用线性回归拟合方法,对洛阳地铁某区间隧道盾构掘进时的地表沉降监测数据进行拟合,引入地表最大沉降修正系数 α 和沉降槽宽度修正系数 β 对单线 Peck 公式进行修正。结果表明:针对单线隧道,采用线性回归方法拟合隧道横断面地表沉降得到的曲线与实际监测数据吻合度高,当修正系数 α 为0.4~0.9、 β 为0.5~0.7时得到的修正 Peck 公式精度最高;针对双线隧道,该地层下的地表沉降基本呈双峰“W”形,双线隧道的土体损失率 η 和沉降槽宽度系数 K 的分布区间分别为0.2%~0.8%和0.2~0.5,平均值分别为0.45%和0.37,且先行线的土体损失率均值、沉降槽宽度系数均值分别为后行线的1.4倍、1.3倍。研究成果可为洛阳典型粉质黏土与砂卵石复合地层中盾构隧道后续施工提供数据支撑。

关键词:隧道盾构;粉质黏土与砂卵石复合地层;Peck公式;线性拟合;地表沉降;修正系数

中图分类号:U455

文献标志码:A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.01.010

随着城市轨道交通的快速发展,城市地下空间利用率迅速增长^[1],因地下工程施工引起的建(构)筑物、市政管道、既有隧道、道路等变形和破坏问题时有发生。城市地下工程施工中引发安全事故的根本原因是地层变形,若能及早预测地表沉降,就能提前采取措施来控制地层变形,这对地下工程施工安全来说具有重要意义。但不同地区的地质条件存在差异,盾构施工引起的地层变形规律也不相同,照搬其他地区的施工经验显然存在问题^[2-3]。目前研究隧道施工引起的地面沉降有很多种方法,如经验公式法、理论分析法、数值模拟法、模型试验法和基于遗传算法的神经网络预测模型^[4]。

其中,经验公式法因其简便易用、精确度高的特点被大量研究采用。该方法最早由 Peck 在分析大量现场实测地表沉降数据的基础上提出。此后,针对不同施工情况,许多学者对该公式进行了进一步修正,Attewell 等^[5]依据大量工程资料,得到了不排水条件下纵向地表变形公式。侯学渊等^[6]引入排水固结概念,分析了盾构掘进时土体超孔隙水压力的变化,得出了修正后的 Peck 经验公式。刘建航等^[7]结合上海隧道实测数据提出“负地层损失”概

念,修正了 Peck 经验公式。吴锋波等^[8]对暗挖隧道在黏性土地层、砂卵石地层的沉降槽 Peck 公式拟合参数进行分析。张建全等^[9]根据北京不同区域下矿山法和盾构法施工地表监测数据,对 Peck 公式参数进行反演,得到相应的经验参数和参数取值范围。徐征杰^[10]根据福州隧道工程典型断面沉降实测数据,得出该地质的 Peck 修正公式。林宝刚等^[11]对南昌地区上软下硬复合地层地铁盾构施工过程进行数值模拟,得出适用于该地质的 Peck 公式。尹光明等^[12]给出了不同工程条件下 Peck 公式参数取值的获取方法。吴华君等^[13]对现有的双线盾构施工地表沉降公式进行了对比分析,提出的二维 Peck 公式能在考虑沉降曲线不对称性的基础上计算土体沉降。张运强等^[14]提出了不同种类土体中盾构隧道施工诱发地层三维沉降的计算公式,并给出相关参数的取值范围。魏纲等^[15]发现 Peck 公式仅在双线隧道间距较近时可以适用。马可栓^[16]采用超几何方法,将先行沉降和附加沉降分别用 Peck 公式计算,较好地解决了双线隧道的非对称性问题。

相关学者对 Peck 经验公式法的研究已取得了一定成效,可方便、准确地预测盾构施工引起的地表沉降。但是此法需要大量实测数据支撑,预测结果

收稿日期:2024-06-16;修订日期:2024-08-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078469);河南省科技攻关项目(242102240031)

作者简介:郜新军(1981—),男,河南南阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事地下工程及岩土工程抗震方面研究, E-mail:gxjun@zzu.edu.cn。

引用本文:郜新军,魏文宇,李珊珊,等. 洛阳盾构隧道地表沉降 Peck 公式参数修正[J]. 郑州大学学报(工学版),2025,46(1):75-81. (GAO X J, WEI W Y, LI S S, et al. Parameters modification of Peck formula for surface settlement of shield tunnelling in Luoyang[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(1): 75-81.)

往往只针对某一地区特定地质条件。洛阳轨道交通工程于2017年正式开始动工,到2022年底,部分线路已建成并开通运营,后期线路正在规划当中。在此之前洛阳市在大规模地下工程诸如大型基坑、隧道工程等方面的建设经验较为匮乏,且该区地层为典型的粉质黏土与砂卵石复合地层,稳定性差,在前期盾构隧道施工中沉降超过报警值的情况频发,因此亟须针对洛阳地区典型地质条件下的盾构隧道施工诱发的地表沉降进行更深层次的研究。本文以洛阳市地铁1、2号线隧道为研究对象,并结合同类地层中的海量现场地表沉降监测数据,得到适用于洛阳粉质黏土与砂卵石复合地层的沉降预测公式,为后期洛阳地区盾构隧道地表沉降预测及安全施工提供理论依据。

1 工程背景

1.1 工程概况

洛阳市地铁1、2号线大部分区间主要穿越粉质黏土与砂卵石复合地层,采用盾构法双线施工;其中1号线青年宫站—夹马营站区间隧道线路沿中州东路东西向敷设,左线全长857.3 m,右线全长858.6 m,左、右线间距为14~43 m,隧道顶部覆土厚度为9.46~20.10 m。该盾构区间隧道外径6.2 m,内径5.5 m,管片厚度0.35 m,每环宽1.5 m。采用2台复合式土压平衡盾构机施工,掘进中左右线距离超过了100 m。盾构分别从夹马营站间错出发,掘进至青年宫站后吊出。

1.2 工程与水文地质条件

洛阳地质主要以粉质黏土地层、卵石地层、细砂地层为主,兼有粉质黏土与砂卵石互层现象,并且局部软硬不均,土体物理力学性质相差大。土层物理特性见表1。

表1 土层分布及物理特性

Table 1 Stratigraphic distribution and physical characteristics

材料名称	厚度 d/m	压缩模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	泊松比 μ
杂填土	1.8	5.0	5.0	10.0	0.30
黄土状	2.0	9.5	28.7	15.0	0.28
粉质黏土	10.2	6.9	19.0	18.0	0.25
粉土	4.9	6.3	17.6	18.5	0.25
细砂	2.4	12.0		20.0	0.25
中密卵石	10.0	60.0		32.0	0.25
密实卵石	12.0	65.0		42.0	0.22

盾构穿越地层主要为粉质黏土与砂卵石复合地层,此地层中开挖面软硬不均,粉质黏土层和砂卵石

层强度差异大,力学性质复杂,增加了盾构施工的难度。地下水类型主要为卵石层孔隙潜水,埋深15.8~20.0 m,水位标高为117.9~122.2 m。

2 隧道地表沉降预测分析

2.1 Peck 预测公式

Peck认为不排水情况下的地表沉降槽曲线近似呈正态分布,并提出了预测地表沉降的经验公式:

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

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

式中: $S(x)$ 为 x 位置处的横向地面沉降量,mm; x 为测点距隧道中心线的距离,m; S_{\max} 为中心线上方地表最大沉降量,mm; i 为沉降槽宽度,m; V_s 为开挖引起的隧道单位长度的地层损失量, m^3/m 。

O'Reilly等^[17]在总结伦敦地区盾构经验的基础上,提出了 i 和隧道深度 Z 之间的线性关系式,因此 V_s 和 i 可分别表示为

$$V_s = \pi R^2 \eta; \quad (3)$$

$$i = \frac{Z}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\psi}{2}\right)} = K. \quad (4)$$

式中: Z 为隧道中心线到地面的距离,m; η 为土体损失率; ψ 为隧道周围土体内摩擦角均值, $^\circ$; K 为沉降槽宽度系数; R 为隧道半径,m。

2.2 单线地表沉降预测分析

先行隧道开挖时,后行隧道还未进行,因此先行隧道开挖引起的地表沉降可以看作是相对独立的。韩焯等^[18]通过对国内多个地区的隧道实测地表沉降数据的统计分析,发现单线隧道尽管开挖工法或地质条件不同,但地表沉降曲线都近似服从高斯分布,Peck公式可以适用;但针对不同地质情况,需要进一步对地面沉降监测数据进行线性回归分析,将回归后的曲线与经典Peck公式比较,判断是否需要修正和确定修正参数。本文选取青年宫站—夹马营站区间3个断面DBC-19、DBC-46和DBC-59作为研究对象,相对位置如图1所示。

从图2的3个断面的横向沉降分布曲线可知,各断面的沉降曲线大致呈正态分布,中心线上方的沉降量最大,从中心线向两边逐渐减小。

基于以上规律,对该区间断面展开线性回归分析。以Peck公式为基础,对式(1)等号两边取对数,进行回归分析:设 \hat{a} 为回归后的常数项, \hat{b} 为回归后的线性系数,则对式(1)两边取对数有

$$\ln S(x) = \hat{a} + \hat{b} \left(-\frac{x^2}{2} \right). \quad (5)$$

$$\begin{cases} S_{\max} = \exp(\hat{a}); \\ i = \frac{1}{\sqrt{\hat{b}}}. \end{cases} \quad (6)$$

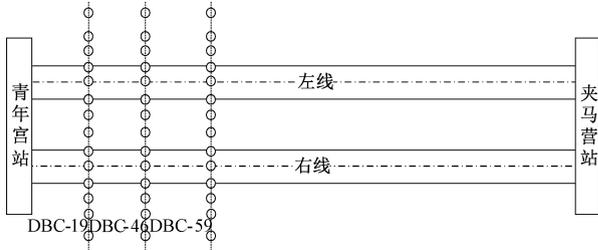


图 1 地表沉降测点平面布置图

Figure 1 Surface settlement measuring point layout

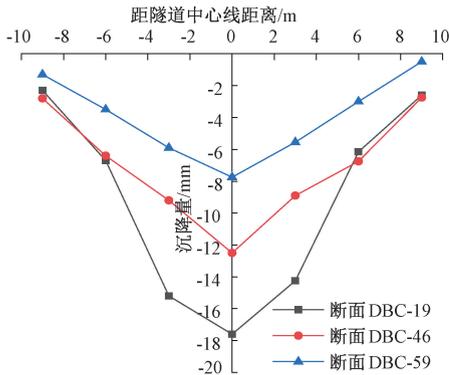


图 2 横向沉降分布曲线

Figure 2 Lateral settlement distribution curve

以断面 DBC-19 监测数据的拟合过程为例,运用回归分析过程计算可得 $\hat{a} = 2.850, \hat{b} = 0.050$ 。线性回归函数为

$$\ln S(x) = 2.850 + 0.050 \left(-\frac{x^2}{2} \right). \quad (7)$$

经回归计算出线性相关系数 $R = 0.989$,表明监测断面 DBC-19 的回归直线对样本点的拟合程度很高。进而由式 (6) 可得 $S_{\max} = 17.288 \text{ mm}, i = 4.472 \text{ m}$,拟合曲线为

$$S(x) = -17.288 \exp \left(-\frac{x^2}{39.998} \right). \quad (8)$$

按照上述线性回归分析过程,其余断面的拟合公式见表 2。

根据地质勘察报告,隧道附近土层的内摩擦角平均值为 23° ,隧道中心线到地面的距离取 15.1 m ,地层损失量可以近似用监测数据拟合的高斯曲线与坐标轴围成的面积代替,结果显示平均地层损失量为 $274 \text{ m}^3/\text{m}$,代入式 (2) ~ (4) 中,可得 S_{\max} 和沉降槽宽度 i 分别为 12.0 mm 和 9.1 m ,于是本区间段原始 Peck 预测公式为

$$S(x) = -12.0 \exp \left(-\frac{x^2}{165.620} \right). \quad (9)$$

图 3 为各断面的原始 Peck 公式预测曲线、地表沉降监测数据和拟合曲线,可以看出未经修正的

表 2 断面拟合参数值

Table 2 Values of section fitting parameters

监测断面	拟合函数	\hat{a}	\hat{b}	R	S_{\max}	i
DBC-46	$S(x) = -11.519 \exp \left(-\frac{x^2}{57.138} \right)$	2.444	0.035	0.992	11.519	5.345
DBC-59	$S(x) = -7.815 \exp \left(-\frac{x^2}{36.363} \right)$	2.056	0.055	0.954	7.815	4.264

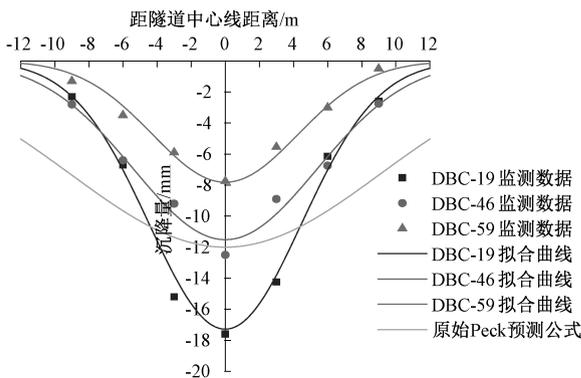


图 3 监测数据、拟合曲线及原始 Peck 曲线对比图

Figure 3 Comparison of monitoring data, fitted curve and original Peck curve

原始 Peck 公式预测曲线与现场监测数据存在着较大差异,经过拟合后的曲线与监测数据吻合度较高,验证了 Peck 公式在预测洛阳粉质黏土与砂卵石复合地层的地表沉降的可行性。

3 基于洛阳地质的原始 Peck 公式修正

前人已经对地表沉降 Peck 预测公式有过研究,不同地层的 Peck 公式参数取值也不尽相同,针对洛阳粉质黏土与砂卵石复合地层条件下的 Peck 预测公式修正研究还较少涉及。根据式 (1) ~ (4) 可知,影响单线 Peck 公式预测准确性的参数主要是地表最大沉降 S_{\max} 和地表沉降槽宽度 i ,因此引入修正系数 α 和 β 对这两个参数进行修正。改进的 Peck 公

式如下所示:

$$S(x) = \alpha S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2(\beta i)^2}\right). \quad (10)$$

结合式(6)得

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\exp(\hat{a})}{S_{\max}}; \\ \beta = \frac{1}{i\sqrt{\hat{b}}}. \end{cases} \quad (11)$$

式中: α 为地表最大沉降修正系数; β 为沉降槽宽度修正系数。

仍以监测断面 DBC-19 为例,由式(11)可得 $\alpha = 1.441$, $\beta = 0.491$ 。同时,收集洛阳地铁 1、2 号线相同地质条件下的 55 组隧道施工监测数据,其中的 50 组按照上述方法进行计算分析,另外 5 组用来检验本文所得的单线 Peck 公式的正确性。对所得到的 \hat{a} 、 \hat{b} 参数进行统计得到图 4,发现 \hat{a} 值大致介于 1.5~2.7 之间,分布占比接近 91%, \hat{b} 值大致介于 0.01~0.07 之间,分布占比接近 91%。

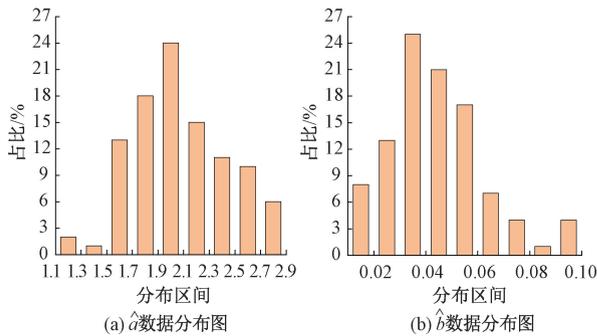


图 4 数据分布图

Figure 4 Data distribution diagram

通过对上述区间范围内的数据进行修正计算,得到修正系数 α 、 β 的分布范围如表 3 所示。可以看出, α 为 0.4~0.9 时,分布占比为 80%, β 为 0.5~0.7 时,分布占比为 71.7%,因此认为当修正系数 α 为 0.4~0.9、 β 为 0.5~0.7 时,可以对洛阳粉质黏土与砂卵石复合地层下盾构施工引起的地表沉降进行更好的预测。

表 3 α 和 β 数据分布范围

Table 3 α and β data distribution range

数据分布	α 占比/%	数据分布	β 占比/%
0.2~0.4	9.1	0.4~0.5	5.1
0.4~0.6	49.1	0.5~0.6	33.3
0.6~0.9	30.9	0.6~0.7	38.4
>0.9	10.9	>0.7	23.3

此时沉降槽宽度系数 K 分布为 0.26~0.36,土体损失率 η 分布为 0.18%~0.58%。取 $K = 0.26$ 、

$\eta = 0.58\%$ 、 $K = 0.36$ 、 $\eta = 0.18\%$ 、 $K = 0.26$ 、 $\eta = 0.18\%$ 、 $K = 0.36$ 、 $\eta = 0.58\%$ 这 4 种极限组合形式,将剩余的 5 组监测数据与修正后的 Peck 公式极限值比较,如图 5 所示。可以看出,超过 90% 的监测数据都落在修正后的 Peck 极限曲线内,说明本文得到的单线修正 Peck 公式可以较为准确地预测洛阳粉质黏土与砂卵石复合地层的地表沉降。

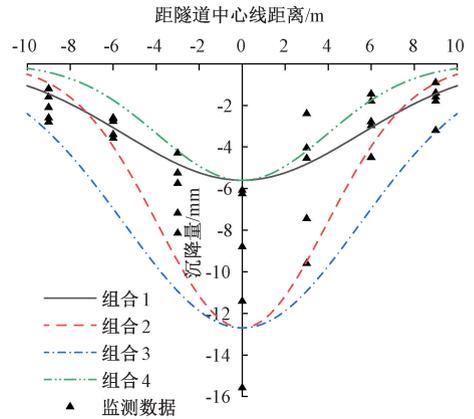


图 5 监测数据与 Peck 预测曲线对比图

Figure 5 Comparison between monitoring data and Peck prediction curve

4 双线地表沉降预测分析

马可栓^[16]采用超几何方法,在 Peck 推导的单线隧道地表横向沉降公式的基础上,考虑双线隧道开挖的相互影响,得到双线隧道地表变形公式。该方法认为先行线和后行线的地表沉降槽宽度和土体损失率均不同,具体计算方法为将先行线和后行线的沉降量分别计算后进行叠加,得到总的沉降量。图 6 所示为双线隧道叠加示意图,双线叠加公式为

$$S(x) = \frac{\pi R^2 \eta_1}{\sqrt{2\pi} i_1} \exp\left(-\frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{2i_1^2}\right) + \frac{\pi R^2 \eta_2}{\sqrt{2\pi} i_2} \exp\left(-\frac{\left(x + \frac{L}{2}\right)^2}{2i_2^2}\right). \quad (12)$$

式中: x 为距离双线隧道对称轴的距离,m; i_1 和 i_2 分别为先、后行隧道地表沉降槽宽度,m; η_1 和 η_2 分别为先、后行隧道土体损失率; L 为双线隧道中心线间的距离,m。

通过对洛阳地铁隧道调查发现,双线隧道间距大都在 2 倍洞径以上,地表沉降曲线多为“W”形。采用式(12)对断面 DBC-19、DBC-46、DBC-59 的双线地表沉降数据进行拟合,并与 3 个断面的先行隧道地表沉降预测结果进行对比,计算结果如图 7 所示。

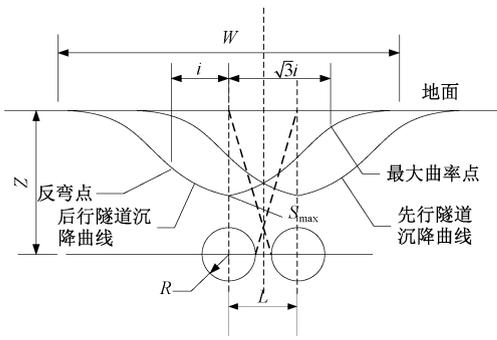


图 6 双线隧道叠加示意图

Figure 6 Schematic diagram of double-line tunnel superposition

由图 7 可知,图中 3 个断面的双线监测沉降值和 Peck 公式预测变形结果基本相符,拟合的相关系

数均在 0.85 以上,拟合曲线均为双峰“W”形曲线,可见采用双线 Peck 公式预测洛阳粉质黏土与砂卵石复合地层盾构掘进引起的地表沉降变形是可行的。先行隧道施工后,地表沉降变形可用修正后的单线 Peck 公式表示,地表最大沉降值位于先行隧道中心线正上方,沉降曲线为单峰形曲线。后行隧道施工后,地表总沉降变形可用双线 Peck 公式表示,沉降曲线为双峰形曲线,且关于双线隧道中心呈明显的非对称形,沉降峰值出现在先行隧道中心线正上方。对比单线地表沉降曲线和双线隧道的先行线上方的地表沉降发现,后行隧道开挖后,对先行隧道造成了一定扰动,导致双线开挖时先行线上方的地表沉降大于先行隧道单独开挖引起的地表沉降。

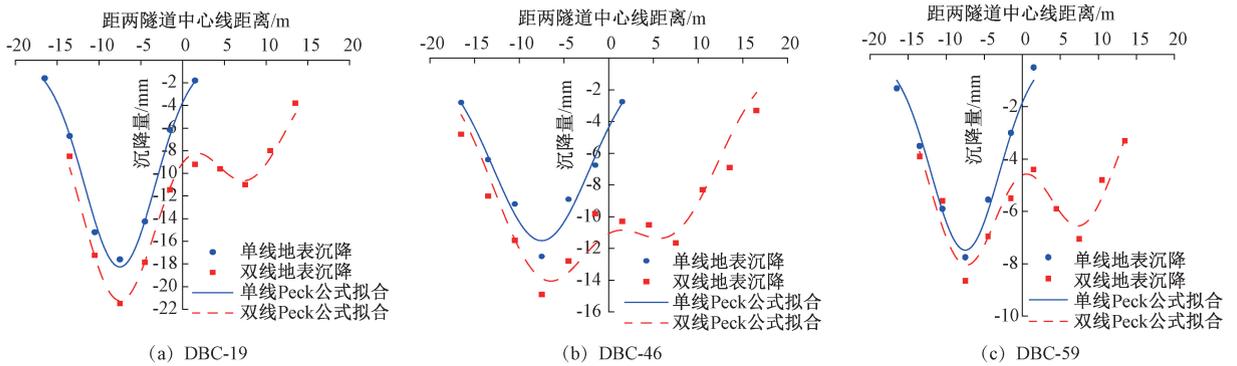


图 7 横向地表沉降拟合曲线

Figure 7 Fitting curve of lateral surface settlements

利用式(12)对洛阳地铁 1、2 号线地质条件下变形曲线符合 Peck 公式的盾构隧道先行线、后行线上各 30 个监测数据构成的 30 组断面数据进行拟合,所得的先行线和后行线的土体损失率 η 分布规律如表 4 所示。由表 4 可知,选取的 30 组断面数据中,约有 93.3% 的土体损失率分布在 0.2%~0.8% 之间,总的平均值为 0.45%,其中先行线土体损失率为 0.2%~0.8% 的占比为 86.7%,平均值为 0.53%,后行线土体损失率为 0.2%~0.5% 的占比为 90%,总的平均值为 0.37%。由此可见,由于后行线的二次扰动,导致先行线和后行线的土体损失率相差较大,建议洛阳此类地层先行线的土体损失率取为后行线的 1.4 倍。

表 4 土体损失率分布规律

Table 4 Distribution law of soil loss rate

类别	0.2%~0.5%		0.5%~0.8%		0.8%~1.2%		η 平均值/ %
	个数	占比/ %	个数	占比/ %	个数	占比/ %	
先行线	17	56.7	9	30.0	4	13.3	0.53
后行线	27	90.0	3	10.0	0	0	0.37
总计	44	73.3	12	20.0	4	6.7	0.45

同理对此 30 组监测数据的沉降槽宽度系数 K 进行统计得到表 5。

表 5 沉降槽宽度系数分布规律

Table 5 Distribution law of width coefficient of settlement tank

类别	$K=0.2\sim0.5$		$K=0.5\sim0.8$		K 平均值
	个数	占比/%	个数	占比/%	
先行线	25	83.3	5	16.7	0.42
后行线	29	96.7	1	3.3	0.32
总计	54	90.0	6	10.0	0.37

由表 5 可知, K 值的主要分布区间为 0.2~0.5,平均值为 0.37,先、后行线的 K 值区间为 0.2~0.5 的比例分别为 83.3% 和 96.7%, K 平均值分别为 0.42 和 0.32,因此建议先行线的沉降槽宽度系数取为后行线的 1.3 倍。

选取相同地质条件下另外 5 组双线地表沉降监测数据与双线隧道 Peck 极限公式对比得到图 8,可以发现,超过 90% 的监测数据都能落在 Peck 预测曲线之间,证明本文得到的沉降槽宽度系数 K 和土体损失率 η 准确性较高。

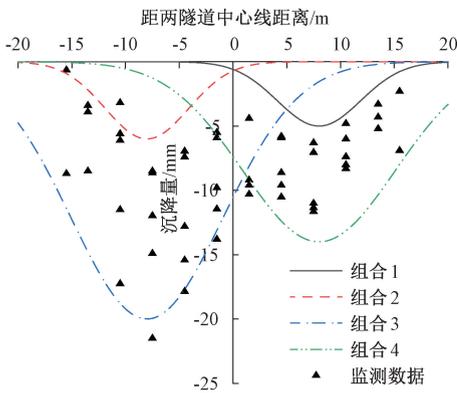


图8 监测数据与 Peck 预测曲线对比图

Figure 8 Comparison between monitoring data and Peck prediction curve

5 结论

基于盾构掘进地表沉降监测数据的分析,提出了适合洛阳粉质黏土和砂卵石复合地层的单线和双线 Peck 经验预测公式,并给出公式中关键参数的取值范围,主要结论如下。

(1)该地层下的单线隧道地表沉降基本呈正态分布,通过对单线监测数据进行线性回归拟合发现拟合相关性较高,说明应用 Peck 公式预测单线隧道地表沉降在本地区是可行的。

(2)当沉降峰值修正系数 α 为 0.4~0.9、沉降槽宽度修正系数 β 为 0.5~0.7 时,该地区盾构开挖引起的地表沉降可以用 Peck 公式较准确地预测。此时沉降槽宽度系数 K 为 0.26~0.36,土体损失率 η 为 0.18%~0.58%,该范围为类似地层的单线地表沉降预测提供依据。

(3)该地层下的双线隧道地表沉降基本呈双峰“W”形,且先行线上方的地表沉降峰值大于后行线,将双线地表沉降监测数据与双线 Peck 公式拟合发现拟合相关性较高,说明双线 Peck 公式在洛阳粉质黏土与砂卵石复合地层的适用性较高。

(4)该地层条件下,双线隧道的土体损失率 η 和沉降槽宽度系数 K 的分布分别为 0.2%~0.8%和 0.2~0.5,平均值分别为 0.45%和 0.37。其中,先行线的土体损失率均值是后行线的 1.4 倍,先行线的沉降槽宽度系数均值是后行线的 1.3 倍。

参考文献:

[1] BOBYLEV N. Mainstreaming sustainable development into a city's master plan: a case of urban underground space use [J]. *Land Use Policy*, 2009, 26(4): 1128-1137.

[2] LI X G, CHEN X S. Using grouting of shield tunneling to

reduce settlements of overlying tunnels: case study in Shenzhen metro construction[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2012, 138(4): 574-584.

- [3] QIAN Q H, LIN P. Safety risk management of underground engineering in China: progress, challenges and strategies[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(4): 423-442.
- [4] 任松,姜德义,杨春和. 基于遗传算法的浅埋隧道开挖地表沉降神经网络预测[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2006, 27(3): 46-49.
- REN S, JIANG D Y, YANG C H. Predicting the earth surface subsidence caused by excavating shallow tunnel with the genetic neural network[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2006, 27(3): 46-49.
- [5] ATTEWELL P B, WOODMAN J P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil [J]. *Ground Engineering*, 1982, 15(8): 13-36.
- [6] 侯学渊,廖少明. 盾构隧道沉降预估[J]. *地下工程与隧道*, 1993(4): 24-32.
- HOU X Y, LIAO S M. Settlement prediction of shield tunnel[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 1993(4): 24-32.
- [7] 刘建航,侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京:中国铁道出版社,1991.
- LIU J H, HOU X Y. Shield tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991.
- [8] 吴锋波,金淮,杨歧焱,等. 北京地铁隧道地表横向沉降槽参数分析[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(5): 660-671.
- WU F B, JIN H, YANG Q Y, et al. Analysis of ground transverse settlement groove parameters of Beijing metro tunnel [J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(5): 660-671.
- [9] 张健全,张克利,姚爱敏,等. 基于实测数据的隧道地表沉降 Peck 经验参数研究[J]. *铁道工程学报*, 2023, 40(3): 89-95.
- ZHANG J Q, ZHANG K L, YAO A M, et al. Peck empirical parameters of tunnel surface settlement based on measured data[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2023, 40(3): 89-95.
- [10] 徐征杰. 基于福州粘性土地层隧道工程的 Peck 公式修正[J]. *建筑技术*, 2023, 54(4): 477-480.
- XU Z J. Modification of Peck formula for tunnel construction in cohesive soil layer of Fuzhou [J]. *Architecture Technology*, 2023, 54(4): 477-480.
- [11] 林宝刚,李飞,李磊,等. 南昌地铁盾构施工地表沉

- 降的 Peck 公式修正[J]. 低温建筑技术, 2022, 44(12): 92-97.
- LIN B G, LI F, LI L, et al. Application of modified Peck formula in shield construction of Nanchang metro[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2022, 44(12): 92-97.
- [12] 尹光明, 傅鹤林, 侯伟治, 等. Peck 公式参数的几种取值方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7): 2015-2022.
- YIN G M, FU H L, HOU W Z, et al. Introduction of several methods of value of Peck formula parameters[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(7): 2015-2022.
- [13] 吴华君, 魏纲. 近距离双线平行盾构施工引起的土体沉降计算[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 63-69, 75.
- WU H J, WEI G. The calculation of soil settlement induced by construction of twin parallel shield tunnels with a small-interval[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 63-69, 75.
- [14] 张运强, 曹文贵, 周苏华, 等. 基于 Peck 公式的盾构隧道施工引起的地层三维沉降预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 153-161.
- ZHANG Y Q, CAO W G, ZHOU S H, et al. Prediction of three-dimensional subsurface and subsurface settlement caused by shield tunnelling based on Peck formula[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(1): 153-161.
- [15] 魏纲, 庞思远. 基于有限元模拟的双线平行盾构隧道近距离界定[J]. 市政技术, 2014, 32(1): 76-80.
- WEI G, PANG S Y. The definition of close range between parallel shield tunnels based on numerical simulation[J]. Municipal Engineering Technology, 2014, 32(1): 76-80.
- [16] 马可栓. 盾构施工引起地基移动与近邻建筑保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- MA K S. Research on the ground settlement caused by the shield construction and the protection of the adjacent buildings[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [17] O'REILLY M P, NEW B M. Settlement above tunnels in the United Kingdom—their magnitude and prediction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(1): 173-181.
- [18] 韩焯, 李宁, STANDING J R. 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, 2007, 28(1): 23-28, 35.
- HAN X, LI N, STANDING J R. An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 23-28, 35.

Parameters Modification of Peck Formula for Surface Settlement of Shield Tunnelling in Luoyang

GAO Xinjun, WEI Wenyu, LI Shanshan, SU Qinghui

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to accurately predict the surface settlement of the shield tunnel in the silty clay and sand gravel composite formation in Luoyang, a linear regression fitting method was proposed. To fit a certain section of Luoyang subway by the monitoring data of surface settlement during shield tunneling, maximum surface settlement correction factor α and settlement tank width correction factor β were brought out modifying the single-line Peck formula. The results indicated that for single-line tunnels, the linear regression method used to fit the surface settlement curve of the tunnel cross-section was in highly consistent with the actual monitoring data. When the correction factor α within the range of 0.4 to 0.9, and β within the range of 0.5 to 0.7, the corrected Peck formula obtained the highest accuracy. For double-line tunnels, the surface settlement under the formation was basically in a bimodal "W" shape. Double-line tunnel's soil loss rate η and the distribution range of the width coefficient of the settlement tank K was 0.2% to 0.8% and 0.2 to 0.5, respectively and the mean values were 0.45% and 0.37, respectively. The average soil loss rate of the leading line and the average width coefficient of settlement tank was 1.4 times and 1.3 times of the rear line, respectively. The research results provided data support for the subsequent construction of the shield tunnel in the typical silty clay and sand gravel composite formation in Luoyang.

Keywords: tunnel shield; silty clay and sand gravel composite formation; Peck formula; linear fitting; surface settlement; correction factor