

基于最小二乘法的隧道地表沉降拟合研究

王润钰¹, 易 顺^{2,3}, 黄珏皓^{2,3}

(1. 武汉华立建设项目管理有限公司, 武汉 430014; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘要:依托武汉市红黏土地区光谷一路-高新四路排水通道工程, 基于有限元分析软件 PLAXIS, 开展双侧壁导坑隧道施工的数值分析, 重点关注不同施工阶段的地表横向沉降曲线。在此基础上, 对不同沉降曲线进行拟合回归分析。结果表明: 随着施工推进, 地表沉降最大值逐步增大, 隧道施工引起的地层损失也逐渐增大; 地表沉降曲线在不同施工阶段都呈 Peck 沉降曲线分布形式; 利用最小二乘法回归分析, 可以对双侧壁导坑隧道施工引起的地表沉降曲线进行拟合。该拟合方法具有较好的适用性。

关键词: 双侧壁导坑隧道; 地表沉降; 最小二乘法; 有限元分析

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2022)04-0389-05

随着中国城镇化加速, 亟须开展大量城市地下工程的建设, 其中就有大量的城市隧道建设。隧道施工不可避免会造成地层扰动, 进而产生不同程度的地表沉降, 从而对隧道施工及周围环境的安全产生不利影响。

目前国内外学者对隧道施工引起的地层或地表沉降进行了大量研究, 并取得了丰硕的研究成果。徐敬民等^[1]研究了地表筏板基础框架结构对隧道施工引起砂质地层移动与变形规律的影响; 李钊等^[2]以甘肃省某隧道台阶法施工参数优化为例, 以上台阶长度和循环开挖进尺为参数, 利用三维有限元分析方法开展围岩及支护结构稳定性分析; 程红战等^[3]和李健斌等^[4]研究了考虑参数空间变异性情况下的隧道地表沉降规律; 易顺等^[5]研究了考虑土体小应变特性的隧道地表及地表变形规律; 张云鹏等^[6]基于高斯过程回归理论对隧道围岩大变形进行了预测; 邓崴等^[7]依托广州地铁 2 号线工程, 对砂土黏土互层地层的地表横向沉降规律展开了研究; 侯丰等^[8]依托温州盾构隧道工程对单线隧道和双线隧道的地表沉降规律展开了研究; 杨福麟等^[9]以武汉地铁虎名区间隧道开挖工程为背景, 对地表沉降展开了数值模拟研究。Peck^[10]在 1969 年提出一种预测地表沉降的经验公式。由于该公式参数较少, 易于理解, 因而 Peck 公式被广泛地应用到隧道工程的案例中^[11-12]。但目前国内对双侧壁导坑隧道引起

的地表沉降研究仍有不足, 利用 Peck 公式来拟合研究地表沉降规律还相对较少。

基于此, 本文依托武汉市红黏土地区光谷一路-高新四路排水通道工程, 提出基于最小二乘法的 Peck 公式拟合方法, 并将该方法应用到双侧壁导坑隧道开挖引起的地表沉降研究中, 对不同施工阶段的地表沉降展开分析, 同时对本文所提出的拟合效果进行研究, 从而为后续类似隧道工程的施工建设提供有益的参考。

1 基于最小二乘法的 Peck 公式回归分析

Peck 公式^[10]的基本假定是: 在不排水情况下, 盾构隧道穿越土层所引起的横断面沉降曲线近似符合正态分布曲线, 同时土体损失体积等于沉降槽体积。Peck 公式的相关公式为

$$\begin{cases} S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \\ S_{\max} = \frac{V_i}{i \sqrt{2\pi}} \\ i = \frac{Z}{\sqrt{2\pi} \tan(45^\circ - \varphi/2)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S(x)$ 为距离隧道中轴线 x 处的地表沉降, m ; $S_{\max}$ 为最大地表沉降, m ; x 为地表到隧道中轴线的距离, m ; i 为沉降槽宽度系数; V_i 为隧道单位长度引起的地层损失, m^3/m ; φ 为隧道周围地层的内摩擦角, $(^\circ)$; Z 为地表到隧道中心的距离, m 。

为了更好地利用 Peck 公式进行回归分析, 对上

收稿日期: 2021-12-30

作者简介: 王润钰(1970—), 男, 湖北武汉人, 武汉华立建设项目管理有限公司, 项目总监, 工程师, 研究方向为房建、市政监理。

式取对数,可以得到

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

基于最小二乘法原理,以 $\ln S(x)$ 和 $-x^2/2$ 为变量进行求解,即以 S 和 x 分别代替 $\ln S(x)$ 和 $-x^2/2$,同时令 $a=\ln S_{\max}, b=1/x^2$,则可以得到

$$S = a + bx \tag{3}$$

利用最小二乘法进行回归分析,相当于考虑回归的误差平方和最小,此时得到的拟合效果是最佳的,即

$$I = \sum_{i=0}^m [S(x_i) - y_i]^2 = \min, i = 1, 2, \cdots, m \tag{4}$$

为了满足该条件,由多元函数求极值的必要条件可知,需使 $\frac{\partial I}{\partial a} = 0, \frac{\partial I}{\partial b} = 0$, 此时可以求得 a 和 b 的值,通过上述公式反演可以得到完整的 Peck 表达式。

2 数值模型的建立

武汉红黏土地区光谷一路-高新四路排水通道工程采用双侧壁导坑法进行施工,隧道穿越自稳性较差的红黏土地层。笔者根据实际情况,基于

PLAXIS 平台建立三维有限元分析模型,由上而下分别为素填土(3.0 m)、红黏土(8.5 m)和强风化硅质岩(28.5 m),模型尺寸为 50 m×20 m×40 m。双侧壁导坑隧道按照实际施工顺序进行分步、分块地开挖。

本文综合考虑目前各本构模型的特性和适用范围,认为红黏土适用于小应变硬化土模型(HSS 模型),因此利用 HSS 模型来表现红黏土的应力应变行为。数值计算的相关参数通过现场勘察资料、PLAXIS 软件手册以及文献资料获取,见表 1。同时在隧道开挖过程中,周围锚杆以梅花桩形式分布在隧道周围进行加固,笔者采用刚度等效的方法对锚杆进行模拟。其中,衬砌及临时支撑以及钢拱架经等效后得到的等效厚度和刚度直接赋予板单元中,结构单元参数见表 2。另外,图 1 给出了双侧壁导坑隧道施工到某一阶段,岩体、初次衬砌、二次衬砌和临时支撑的空间位置图。对于整个数值模型,其底部施加竖向位移约束,前、后两侧施加 y 方向位移约束,左、右两侧面施加 x 方向位移约束。开展数值计算之前首先对整个模型进行初始地应力平衡。

表 1 土体参数

土体	本构模型	重度 γ / (kN/m³)	模量 E / MPa	泊松比 ν	内摩 擦角 φ /(°)	黏聚力 c /kPa	参考割 线模量 E_{50}^{ref} /MPa	参考切 线模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	参考 应力 p^{ref} /kPa	幂指数 m	参考初始 剪切模量 G_0^{ref} /MPa	剪应变 阈值 $\gamma_{0.7}/10^{-4}$
素填土	MC	17.6	15	0.35	8	8	—	—	—	—	—	—
红黏土	HSS	18.9	20	0.35	22	15	6.667	6.155	100	0.9	60	2
硅质岩	MC	23.0	21.47e³	0.17	56	26	—	—	—	—	—	—

表 2 结构参数

结构单元	厚度 d /m	重度 γ / (kN/m³)	杨氏模量 E /GPa	泊松比 ν
初次衬砌	0.2	22	38	0.20
临时支撑	0.022 7	22	38	0.20
二次衬砌	0.6	22	38	0.20

3 地表沉降分析

在隧道开挖过程中,需要对地表沉降变形进行重点关注。为避免数值模型边界因素的影响,选取隧道掘进方向最中间位置处的横剖面作为研究对象,分析该剖面处的地表沉降随施工过程的变化规律。图 2 给出不同阶段的剖面地层竖向位移云图,其中以左上导洞和中下导洞进尺情况描述施工进度。从中可以看出,随着隧道的向前推进,地层的沉降变形逐步增大,Peck 沉降凹槽范围逐步向外

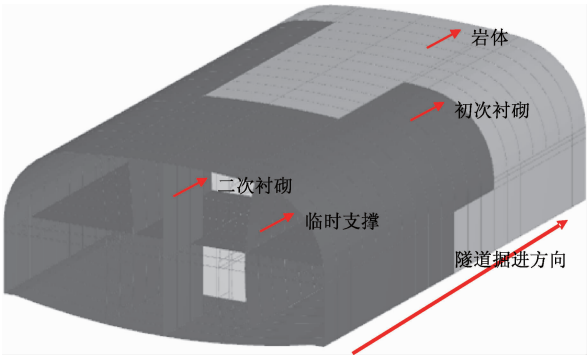


图 1 双侧壁导坑隧道掘进至某一开挖阶段时的情况

延伸。

在此基础上,提取地表沉降数据,绘制如图 3 所示的地表横向沉降过程曲线。可以看出随着施工推进,地表沉降最大值逐步增大,隧道施工引起的

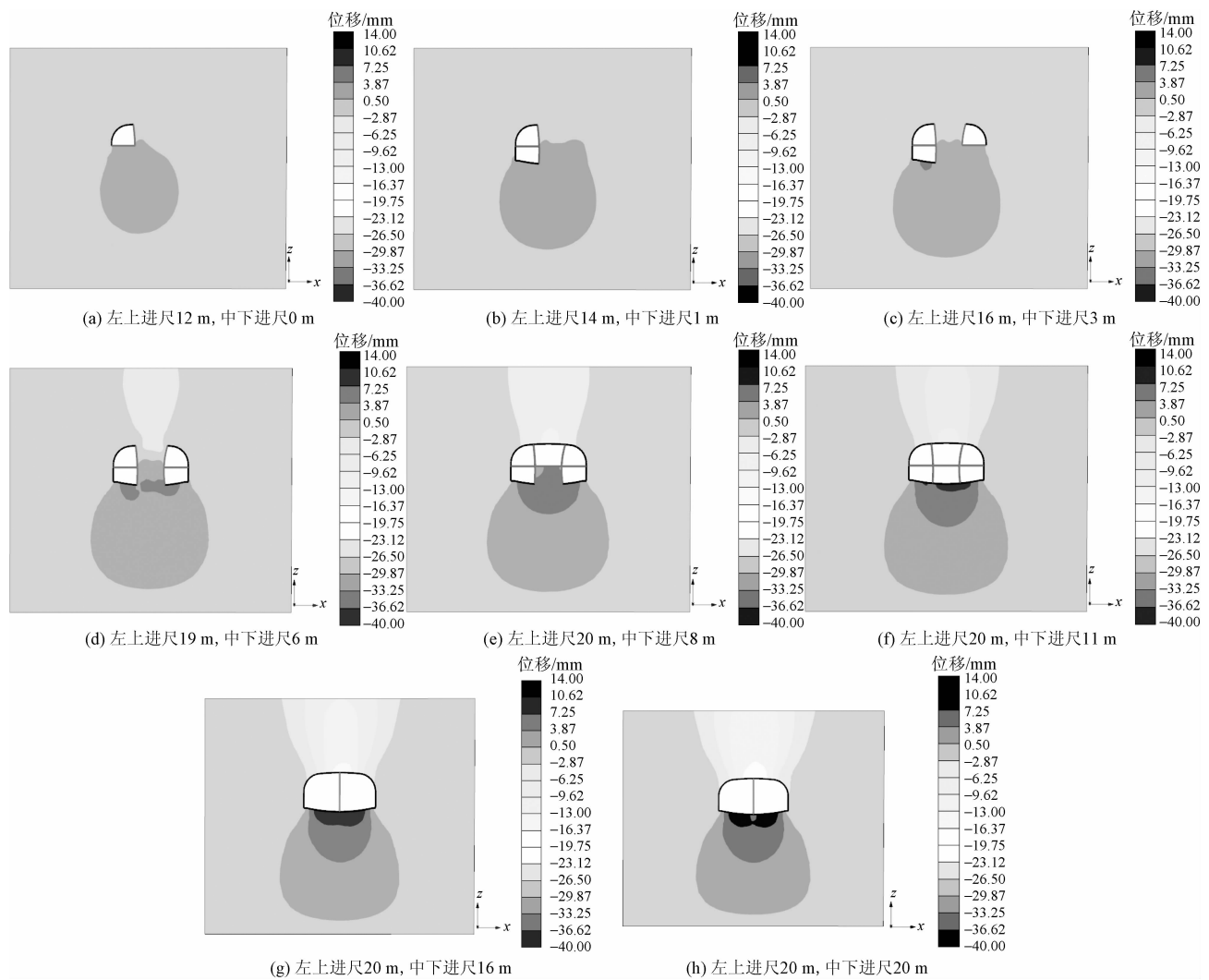


图 2 数值模型轴向中央剖面的地层竖向位移云图

地层损失也逐渐增大;地表沉降曲线在不同施工阶段都呈 Peck 沉降曲线分布形式。以此为基础,利用 Peck 公式对不同施工阶段的地表沉降曲线展开回归分析。

利用第 2 节中的回归分析步骤进行分析,图 4 分别给出左上进尺 20 m,中下进尺 8 m;左上进尺 20 m,中下进尺 11 m;左上进尺 20 m,中下进尺 16 m;左上进尺 20 m,中下进尺 20 m 这 4 种情况下,地表沉降的拟合回归情况。可以看出,不同施工阶段的地表沉降曲线拟合度都超过 98%,说明了基于最小二乘法的回归分析对双侧壁导坑隧道施工引起的地表沉降曲线拟合的正确性。

4 结论

本文依托武汉红黏土地区光谷一路—高新四路排水通道工程,基于 PLAXIS 软件平台,对双侧壁导坑隧道施工过程展开数值分析。在此基础上,

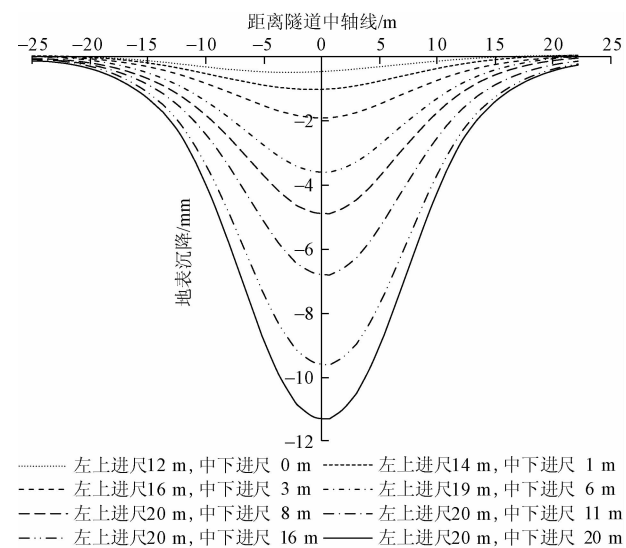


图 3 不同施工阶段的地表横向沉降曲线

利用最小二乘法的回归分析方法对不同施工阶段的地表沉降曲线进行拟合,得到以下结论:

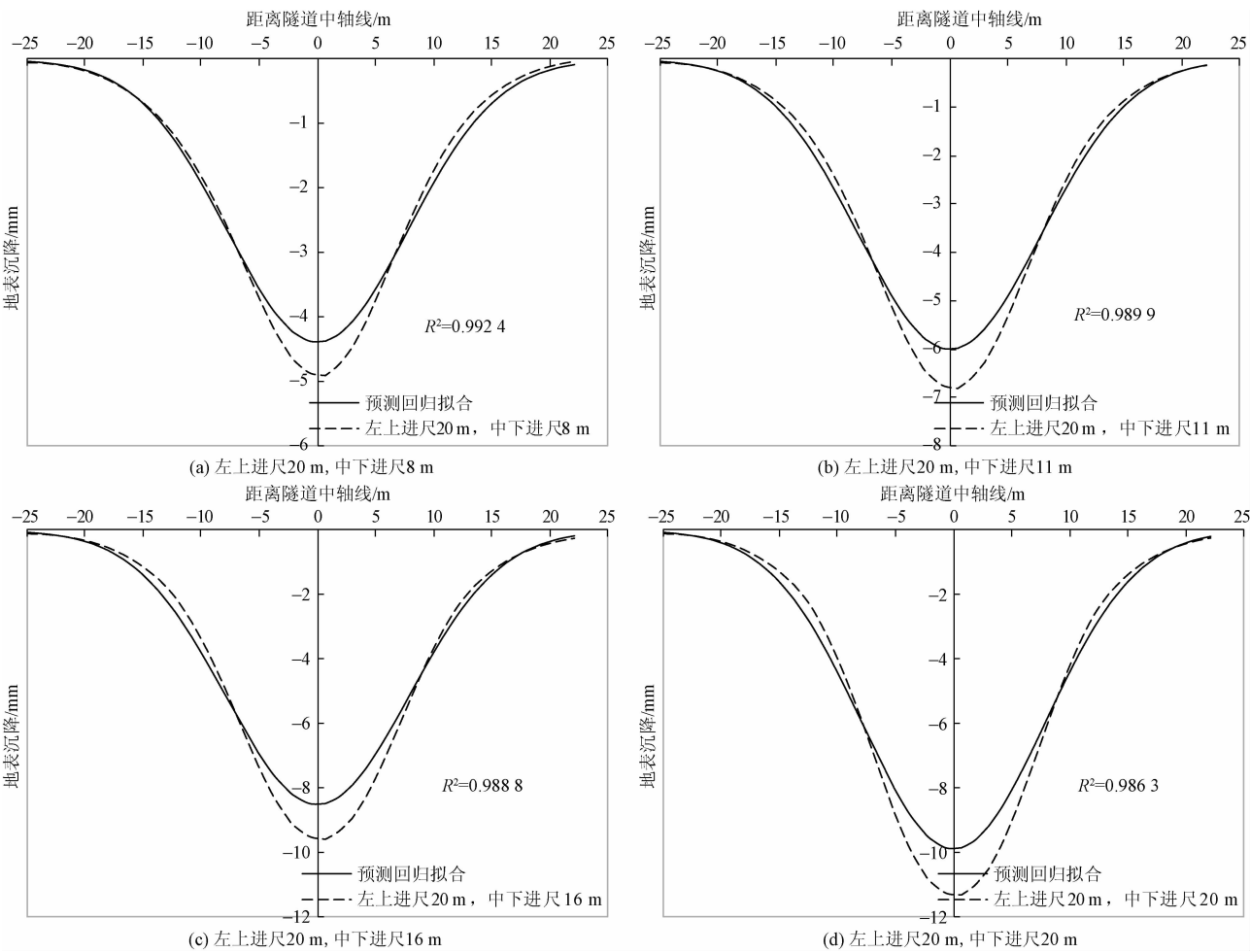


图 4 不同施工阶段地表横向沉降曲线的回归分析

1)随着施工推进,地表沉降最大值逐步增大,隧道施工引起的地层损失也逐渐增大;地表沉降曲线在不同施工阶段都呈 Peck 沉降曲线分布形式。

2)基于最小二乘法对双侧壁导坑隧道施工引起的地表沉降曲线进行拟合是合理的。

参考文献

[1] 徐敬民,章定文,刘松玉. 地表框架结构作用下隧道施工诱发的砂质地层变形[J/OL]. 岩土工程学报,1-11[2022-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.tu.20211211.1844.004.html>.

[2] 李钊,梁庆国,孙文,等. 隧道台阶法施工上台阶长度对隧道变形的影响[J/OL]. 隧道与地下工程灾害防治,1-11 [2022-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1516.U.20211210.1637.002.html>.

[3] 程红战,陈健,李健斌,等. 基于随机场理论的盾构隧道地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S2): 4256-4264.

[4] 李健斌,陈健,罗红星,等. 基于随机场理论的双线盾构隧道地层变形分析[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(7):

1748-1765.

[5] 易顺,陈健,柯文汇,等. 考虑小应变特性的软土盾构隧道地层变形分析[J]. 岩土工程学报,2020,42(S2):172-178.

[6] 张云鹏,李利平,贺鹏,等. 隧道围岩大变形高斯过程回归预测模型及其工程应用[J]. 科学技术与工程,2018,18(1):122-127.

[7] 邓崑,潘建平,曾雅钰琼. 砂黏复合地层盾构隧道施工地表横向沉降分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(18): 271-275.

[8] 侯丰,刘府生. 深厚软土盾构隧道施工地表沉降数值模拟计算[J]. 科技和产业,2021,21(6):294-298.

[9] 杨福麟,刘永林,胡斌. 武汉地铁隧道开挖引起地表沉降的数值模拟研究[J]. 工程地质学报,2013,21(1):85-91.

[10] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico:Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, A. C.,1969: 225-290

[11] SOU-SEN L, HSIEN-CHUANG L. Neural-network-based regression model of ground surface settlement induced by deep excavation[J]. Automation in Construc-

tion,2004,13(3):279-289.

[12] 廖林昌,王非,吕伟华. 城市地铁隧道施工引起的地面沉降[J]. 东南大学学报(自然科学版),2008,38(2):293-297.

Study on Surface Settlement Induced by Tunnel Based on Least Square Method

WANG Runyu¹, YI Shun^{2,3}, HUANG Juehao^{2,3}

(1. Wuhan Holley Construction Project Management Co.,Ltd,Wuhan 430014,China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071,China; 3. School of Engineering Science,University of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100049,China)

Abstract: Based on the Guanggu 1st Road-Gaoxin 4th Road Drainage Channel Project in the red clay area of Wuhan City, the finite element analysis software PLAXIS was used, numerical analysis of the tunnel with double-side drift method was carried out, focusing on the surface settlement at different stages. On this basis, a fitting regression analysis was performed for different settlement curves. The results show that as the tunnel propulsion, the maximum surface settlement gradually increases, and the volume loss caused by tunneling also gradually increases. The surface settlement curve is in the form of Peck settlement curve distribution at different stages. It is proper to fit the surface settlement curve induced by tunneling using least square regression analysis.

Keywords: tunnel with double-side drift method; surface settlement; least square method; finite element analysis