

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.02.017

大直径盾构施工穿越复合地层引起地表位移预测

商兆涛¹, 匡星辰², 夏琴¹, 刘武², 熊峰², 王佐才²

(1. 芜湖市轨道(隧道)交通工程质量安全监督站, 安徽 芜湖 241000; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:大直径盾构穿越多种复杂地层时极易引起地层不均匀沉降,为研究地表沉降规律,文章依托芜湖城南过江隧道工程,分别分析了盾构穿越全砂层、软硬复合层以及全岩层时各横断面地表沉降监测数据,并采用数值模拟及拟合 Peck 经验公式的方法进行验证,最后通过引入修正系数 α 、 β 对 Peck 经验公式进行修正。研究表明,不同地层盾构施工时地表沉降分布规律基本一致,但在沉降值方面,盾构穿越软硬复合地层时地表沉降远超其他 2 种地层。综合考虑工程地质条件和实际施工参数,建立三维数值模型,通过对现场监测数据进行反分析修正模型参数。基于经典的 Peck 经验公式对盾构穿越各地层时的监测数据进行拟合,结果表明该经验公式能较好地预测地表沉降。以数值模拟结果为标准,基于大量监测数据的统计分析提出了上、下限 Peck 修正公式,修正后的 Peck 公式可以更有效、更全面地描述盾构穿越不同地层引起地表横向沉降的规律。该研究结果可为后续工程的施工及类似工程的设计和施工提供参考。

关键词:大直径盾构;地表沉降;数值模拟;Peck 公式;参数修正

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)02-0251-09

Prediction of surface displacement caused by large diameter shield tunneling through composite strata

SHANG Zhaotao¹, KUANG Xingchen², XIA Qin¹, LIU Wu², XIONG Feng², WANG Zuocai²

(1. Wuhu Rail(Tunnel) Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Station, Wuhu 241000, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: As large diameter shield tunneling passes through complex geological strata, it usually causes uneven settlement. To investigate the surface settlement characteristics, this study uses monitoring data collected during the Wuhu Chengnan River Crossing Tunnel Project and analyzes the surface settlement of each cross-section when the shield tunneling passes through full-section sand strata, soft-hard composite strata, and full-section rock strata. Numerical simulation and Peck empirical formula are employed to validate the monitoring data, and correction coefficients α and β are then introduced to further modify the Peck formula. The results indicate that the distribution of surface settlement is basically consistent for different geological strata during shield tunneling, however, the surface settlement in the soft-hard composite strata is much higher than that in the other two strata. Based on the engineering geological conditions and actual construction parameters, a three-dimensional numerical model is established and the parameters are corrected by back analysis of on-site monitoring data. The monitoring data of shield tunneling passing through various strata is fitted according to the classic Peck empirical formula, indicating that the empirical formula can effectively predict the surface settlement. Furthermore, based on the numerical simulation results and statistical analysis of a large amount of monitoring data, a Peck correction formula with upper and lower limits is proposed to effectively predict the

收稿日期:2023-05-06;修回日期:2023-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278301)

作者简介:商兆涛(1983—),男,山东梁山人,芜湖市轨道(隧道)交通工程质量安全监督站高级工程师;

王佐才(1982—),男,湖南双峰人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: wangzuocai@hfut.edu.cn.

surface settlement caused by shield tunneling through different strata with higher accuracy. The research results provide a reference for subsequent and similar engineering projects.

Key words: large diameter shield tunneling; surface settlement; numerical simulation; Peck formula; parameter correction

0 引言

在过江隧道的设计中,通常采用大直径盾构机进行施工并且穿越多种复杂地层,然而隧道的施工不可避免会引起地层的扰动,造成地表出现不均匀沉降^[1]。由于施工条件的限制和安全性等问题,盾构施工在穿越不同地层时地表沉降规律也会有所不同。现阶段对于盾构施工引起地表沉降规律的研究方法主要分为经验公式法、数值模拟法、模型试验法及理论解析法等。其中经验公式预测法是基于 Peck 经验公式对各个地方实际工程的监测数据进行统计分析,选取合适的沉降槽宽度系数和地层损失率来预测地表沉降。

文献[2-3]收集全国 8 个地区的大量实测数据,分析 Peck 公式在我国的适用性并给出相关参数的建议值。然而监测数据的离散性较大,同时不同地区样本存在差异性,经验公式中参数选取仅提供参考。

文献[4-6]通过引入修正系数,基于 Peck 公式将监测数据拟合提出 Peck 修正公式,该方法未考虑盾构掘进参数等因素的影响。数值模拟法主要是基于现场实际工程,建立有限元或有限差分等模型进行模拟,文献[7-10]分别对盾构穿越砂土地层及复合地层进行模拟。然而本构模型及参数选取是数值模拟中的关键也是难题^[11],需要结合现场监测数据对本构模型及参数进行反演进而修正模型。

文献[12-13]在模型试验方面针对砂卵石地层、上软下硬地层通过室内模型掘进试验及离散元数值模拟,研究发现在掘进过程中由于超挖导致土体扰动的规律。解析法方面主要采用随机介质理论、镜像法及 Mindlin 解分析隧道开挖对地层的扰动^[14-15],但该方法难以全面考虑施工参数且主要针对均质地层。

本文以大直径盾构穿越不同地层为研究背景,综合考虑工程地质条件和实际施工参数,结合实际工程经验对数值模拟参数进行修正,并引入 Peck 经验公式修正系数,建立适用于不同地层类型的预测公式,为后期施工及类似工程提供参考。

1 工程概况及沉降分析

芜湖城南过江隧道为安徽省第一条过江隧道,项目全长 5.965 km,西起江北新城,东至江南主城,其中盾构段约为 4.0 km,道路等级为城市快速路,双向六车道,隧道开挖采用 2 台直径为 15.07 m 大直径盾构机进行掘进,内径 13.3 m,外径 14.5 m,管片宽度为 2 m,隧道最大纵坡 4%,隧道右线于 2021 年 11 月先行掘进,左线于 2022 年 4 月后行掘进,左右线开挖面纵向距离相距较远,动态纵向距离均大于 100 m,在正常施工情况下相互影响较小。本文选取右线开挖面作为研究对象,考虑到后行掘进的左线对右线开挖面影响较小,且右线开挖面的沉降监测数据更符合 V 型分布,沉降最大值出现在隧道右线轴线上方位置,因此选取单线隧道施工确定地表沉降分布^[15-17]。

本文以右线掘进至 YK3+480~YK4+380 段为研究对象,盾构先后穿越全断面砂层、软硬复合地层、全断面岩层,并穿越江底至城南接收井,隧道埋深由浅到深,最小埋深为 27 m,最大深度达 47 m。

本文研究的盾构穿越不同地层地质剖面图如图 1 所示。

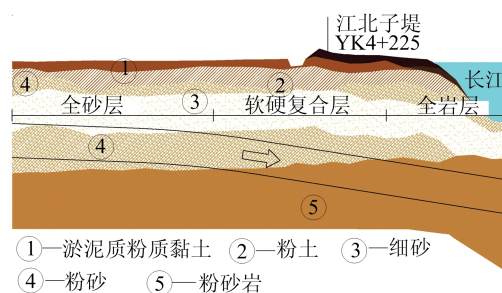


图 1 盾构穿越段地质剖面图

过江隧道施工前对现场地质的岩土参数进行了详细的调查,根据地勘报告可知,该场区内的地层自上而下分别为淤泥质粉质黏土、粉土、粉砂、细砂、强风化粉砂岩和中风化粉砂岩,地下水主要为松散岩类孔隙水,含水介质主要为细粉砂层、粉质黏土和黏性土层,场区内主要地层的物理力学性质见表 1 所列。

表 1 场区地层岩土参数

土体	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	厚度/m
粉质黏土	24	0.32	17.1	12	6	1.0
淤泥质粉质黏土	48	0.30	18.4	15	22	7.5
粉土	60	0.29	19.5	2	27	18.0
粉砂	90	0.28	20.0	3	30	20.5
中风化粉砂岩	2.1×10 ⁴	0.23	21.9	1.5×10 ⁴	38	22.9

盾构掘进过程中全线布置纵向地表沉降监测点,其中每隔 100 m 或周边环境较为复杂时设置主要横断面监测点,一般在隧道轴线上方两侧布设,共设置 7 个监测点,地表沉降监测点布置如图 2 所示。

考虑到芜湖过江隧道盾构穿越地层复杂,且在 YK3+480~YK4+380 段分别穿越砂层、软硬复合层以及全砂岩层,因此选取这部分的隧道作为监测区域,对盾构穿越不同地层地表沉降规律进行分析。现根据监测资料选取具有代表性的

监测断面数据来进行分析,监测断面沉降数据见表 2 所列。

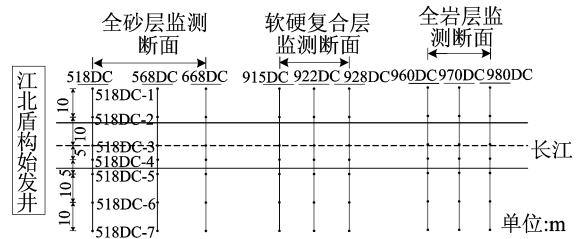


图 2 地表沉降监测布点图

表 2 各断面地表沉降监测值 单位:mm

地层	断面	距隧道轴线距离/m						
		-20	-10	0	5	10	20	30
全砂层	518DC	1.65	4.84	7.14	6.74	5.41	2.66	1.33
	568DC	5.93	7.20	8.24	6.84	6.05	5.72	2.82
	668DC	4.70	6.07	9.34	8.02	7.06	5.95	2.15
软硬复合层	915DC	4.00	5.97	11.82	6.27	7.26	2.34	2.77
	922DC	7.14	9.40	16.44	14.73	8.58	7.36	5.63
	928DC	4.59	5.20	17.75	9.76	7.90	4.29	3.50
全岩层	960DC	0.96	1.91	2.31	2.27	1.70	1.12	0.52
	970DC	1.31	1.52	2.29	2.18	1.49	0.46	0.15
	980DC	0.70	1.70	1.70	2.21	1.91	1.18	0.65

从表 2 可以看出,隧道在掘进过程中穿越全岩层时地表沉降最小,沉降最大值为 2.31 mm,穿越全砂层的地表沉降最大值为 9.34 mm,穿越软硬复合层沉降最大,达到 17.75 mm,且各个横断面地表沉降值都沿隧道轴线向两侧逐渐变小。现选取 3 种地层代表横断面的沉降进行分析比较,对比结果如图 3 所示,3 个断面的横向地表沉降规律基本一致,沉降最大值位置在隧道轴线的顶部。

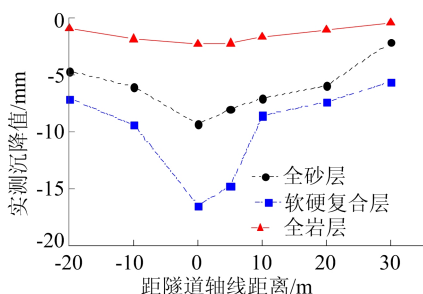


图 3 横断面实测沉降值对比

基于文献[7-10]可知,砂土地层埋深浅,土拱形成所需时间长,大直径盾构开挖对砂土地层扰动最大,在岩体中掘进由于围岩自身稳定性较高,因此对地表沉降影响最小,软硬复合层掘进时地表沉降应该介于二者之间。然而,实际监测数据表明,盾构掘进至软硬复合层处沉降最大,影响范围也更大,这是由于在施工过程中,掘进至软硬复合层时盾构机掌子面推力参数与砂层、岩层不同,需要调整掌子面附加推力和推进速度,增加了对复合层中上层砂土的扰动,同时盾构机停机维护的频次多、时间长,在此过程中土层可能发生蠕变,也是软硬复合层沉降变大的原因之一。

2 数值模拟验证

2.1 模型建立

根据现场实际施工情况,考虑到隧道为双线

开挖,因此模型以双线隧道轴线为中心对称建立。一般情况下,盾构施工对横向地表沉降的影响范围在左、右两侧 3 倍洞径附近,纵向地表沉降影响在前、后 3 倍洞径,为模拟在 3 种不同地层的掘进,最大轴线埋深可以达到 50 m,建立的模型尺寸(长×宽×高)设置为 120 m×60 m×100 m,基本可以涵盖掘进过程中的影响范围,同时忽略边界条件的影响。

将模型地层都设置为水平均匀分布,隧道在掘进过程中埋深保持不变,通过调整埋深来考虑隧道在不同地层中掘进对周围的影响。为了考虑盾构机与土体的相互作用,在盾构区段最外层与土体设置接触面模拟掘进过程中的盾壳与土体的摩擦作用。掌子面附加推力和盾尾注浆压力通过在掘进正前方和盾尾处设置面荷载进行模拟,与中、小直径盾构机不同,大直径盾构机掘进过程中掌子面附加推力分布不均,可以假设掌子面推力由上至下均匀递增,同样盾尾注浆压力也是根据注浆孔位置的不同由上至下设置递增的压力。为了模拟实际施工过程,采用 2 m 循环开挖的方式来模拟实际开挖过程,每次向前开挖 2 m,掌子面施加线性递增水平推力,盾尾施加环向消散的注浆压力,计算完成后先移除上一环的掌子面附加推力和盾尾注浆压力,再向前开挖 2 m,施加该环的掌子面附加推力和盾尾注浆压力,依次循环向前直至开挖结束,模型如图 4 所示。

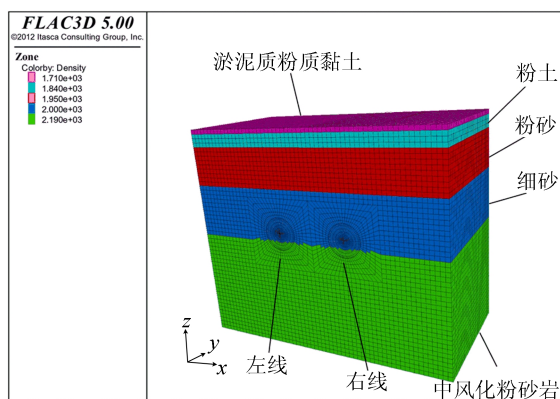


图 4 数值计算模型

2.2 参数选取

采用 FLAC3D 有限差分软件建立模型,在数值模拟过程中土体本构模型选取摩尔库伦模型,土体参数按照表 1 中的数据选取,考虑到相对于周围材料接触面是刚性的,在荷载作用下可以产生滑移,因此接触面的法向刚度和剪切刚度可以

设置为周围相邻区域最硬材料等效刚度的 10 倍。盾构和衬砌参数的选取见表 3 所列。盾构穿越地层主要为粉细砂、粉质黏土和粉砂岩,为保证施工过程中地表沉降处于安全范围,采用同步注浆技术,并使用水泥砂浆进行注浆作业,注浆速度与盾构机推进速度匹配。考虑到注浆层固结体强度应满足 1 d 强度不小于 0.2 MPa,28 d 强度不小于 1.0 MPa,选取注浆层弹性模量为 2.0 MPa。

施工过程中,注浆压力过小,浆液填充速度过慢、填充不充足,会使地表变形增大;而注浆压力过大时,虽然会产生地表隆起抵消一部分下沉,但考虑到盾构埋深较大,覆土较厚,因此对地表沉降的抬升效果有限,且周边地表隆起会导致周围土体劈裂、破坏盾尾密封装置,并易造成跑浆^[18]。本工程同步注浆压力设定为 0.3~0.5 MPa,并对监控量测结果作适当调整。同步注浆量充填系数范围为 180%~250%。

根据实际掘进过程中掌子面附加推力的参数,将数值模拟过程中推力设置为 200 kPa,推力沿着隧道拱顶到拱底线性递增大小为 20 kPa/m。根据现场实际监测的盾尾注浆压力范围(200~300 kPa),将环形应力分为 3 个部分:上注浆孔压力为 200 kPa,中间注浆孔为 250 kPa,底部注浆孔为 300 kPa。

表 3 盾构及衬砌参数

参数	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN/m ³)	厚度/m
盾构机(单元)	2×10^5	0.3	78	
衬砌(实体)	2.85×10^4	0.2	25	1.2
注浆层	2.0	0.3	20	0.6

2.3 模型验证

本节将上文中盾构穿越 3 种不同地层的实际沉降监测数据与设置相同工况的数值模拟结果进行对比,以此来证明模型建立以及参数选取的正确性,同时也可以结合实际工程中遇到的问题调整相关模拟参数来分析地表沉降异常的原因。选取的模拟结果均为 $y=30$ 处的横断面沉降数据,将盾构掘进穿越 3 种断面时的模拟结果分别与上文中的 3 种不同地层的 9 组横断面地表沉降监测数据进行对比,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,数值模拟在 3 种地层盾构掘进时的地表沉降曲线规律基本一致,都呈现高斯分布曲线的形状,其中模拟全砂层和全岩层时得到的模拟结果与实际监测结果尽管不完全一致,但是其沉降规律基本一致,且最大沉降值的误差均

在可接受范围内。另外,由图 5b 可知,模拟盾构穿越复合地层时的沉降规律虽然基本一致,但沉降值差异非常大,考虑到实际盾构穿越软硬复合地层时,遇到停机开仓维修等情况需要对切口进行保压处理,故需调整数值模拟中的附加推力和注浆压力。由于实际施加的推力变化范围较大且比正常掘进时推力小,因此调整附加推力参数为 100 kPa 以此模拟盾构掘进过程中实际施加的推力;注浆压力调整为 150~200 kPa,同时注浆量也适当减小,与现场实际监测的注浆压力一致。图 5b 表明模拟结果与实际监测值较为接近,说明在模拟时需要充分考虑施工时掘进参数的变化,由此证明本文建立的数值模拟模型是合理的,模拟结果可作为预测大直径盾构穿越不同地层时地表沉降的方法。

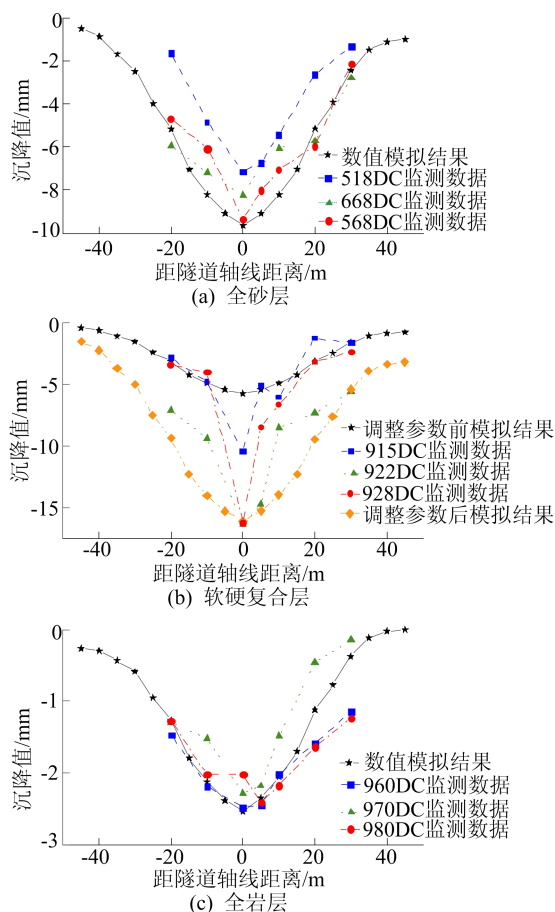


图 5 不同地层沉降值模拟结果与监测数据对比

3 Peck 公式及回归分析预测地表沉降

1969 年美国学者 Peck 基于大量的隧道施工现场地表沉降实测数据分析,不考虑土体固结排水和蠕变、地层土体不均匀分布等因素的影响,推导出地表横向沉降的经验公式,并得到了沉降规

律近似为正态分布曲线、地表沉降曲线如图 6 所示。图 6 中: W 为沉降槽宽度; i 为沉降槽宽度系数; S_{\max} 为最大地表沉降值; h 为隧道埋深; R_0 为隧道半径。

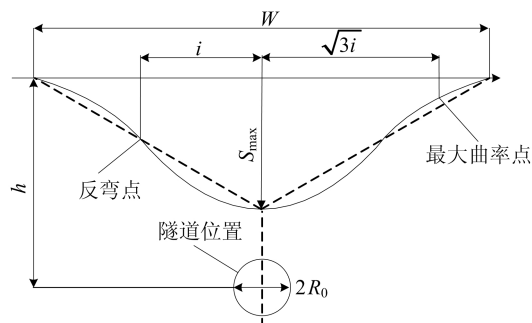


图 6 地表沉降槽曲线

Peck 经验公式已经成为预测各类隧道工程地表沉降最广泛的方法之一,其表达式为:

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

$$S_{\max} = \frac{V}{i \sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

$$V = \eta \pi R_0^2 \quad (3)$$

其中: x_k 代表距离隧道轴线为 x 的第 k 个点地表位置; $S(x_k)$ 表示距离隧道轴线水平距离为 x_k 时地表的沉降值; S_{\max} 为最大沉降值; i 为沉降槽宽度系数; V 为隧道施工地层损失值; η 为地层损失率; R_0 为盾构隧道半径。

现在需要预测盾构隧道影响范围内任意位置的地表沉降,则首先需要得到横断面地表最大沉降值 S_{\max} 和沉降槽宽度系数 i ,为了进一步研究盾构施工对地表沉降的影响,在已知盾构施工过程中的监测数据条件下,拟合地表沉降数据,对式(1)进行线性回归分析,转换后得到线性回归方程为:

$$\ln S(x_k) = \ln S_{\max} + \left(-\frac{x_k^2}{2}\right) \frac{1}{i^2} \quad (4)$$

以 $\ln S(x_k)$ 和 $-\frac{x_k^2}{2}$ 为回归方程变量,令

$$a = \ln S_{\max}, \quad b = \frac{1}{i^2},$$

则式(4)变为:

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

其中, a 、 b 分别为回归方程中的常数项和线性系数。

线性回归过程如下:

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

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

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

$$\hat{b} = S_{xy}/S_{xx} \quad (9)$$

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

由此可以得到回归后的 S_{\max} 和 i 为:

$$S_{\max} = e^{\hat{a}} \quad (11)$$

$$i = 1/\sqrt{\hat{b}} \quad (12)$$

采用线性相关系数 R 分析线性回归的相关性, R 的表达式如下:

$$R = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad (13)$$

当 $R > r_{0.01}(k-2)$ 时, 说明回归方程线性相关度高度显著; 当 $R > r_{0.05}(k-2)$ 时, 说明回归方程线性相关度显著。

4 线性回归分析及 Peck 预测公式

将表 2 中的 3 种地层的 9 组监测数据分别按照上述方法进行线性回归, 全砂层的监测数据线性回归后得到的拟合系数及线性相关系数见表 4 所列。现对该断面沉降值的线性回归结果进行分析。

表 4 全砂层断面拟合参数

断面	S_{xx}	S_{xy}	S_{yy}	\hat{a}	\hat{b}	R
518DC	155 312.5	612.933	2.807	1.814 5	0.003 9	0.928
568DC	155 312.5	316.343	0.719	2.046 7	0.002 0	0.945
668DC	155 312.5	448.874	1.400	2.136 0	0.002 9	0.963

采用数理统计的方法对监测数据进行线性回归, 可以通过回归分析中的线性相关系数 R 值确定数据拟合的相关程度。 $R > r_{0.01}(n-2) = 0.875$ 时, 表示回归方程的线性相关程度高度显著, $R > r_{0.01}(n-2) = 0.754$ 时, 表示线性相关程度显著。

从表 4 可以看出, 全砂层监测数据的线性相关系数 R 分别为 0.928、0.945、0.963, 表示监测数据的线性相关程度高度显著, 将线性回归常数项 \hat{a} 和线性系数 \hat{b} 代入式(5)中可以得到 3 个全砂层断面的线性回归方程, 线性回归结果如图 7 所示。

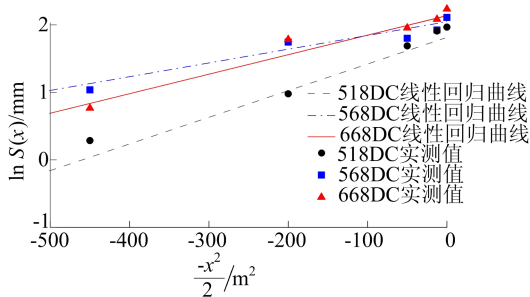


图 7 全砂层参数线性回归曲线

将 3 组线性回归方程中的 \hat{a} 和 \hat{b} 分别代入式(11)和式(12)中, 可以得到在全断面砂层掘进时各断面的 Peck 拟合公式, 全砂层 Peck 拟合曲线和实测值的对比结果如图 8 所示。从图 8 可以

看出, 拟合后的 Peck 公式可以较好地预测地表沉降。

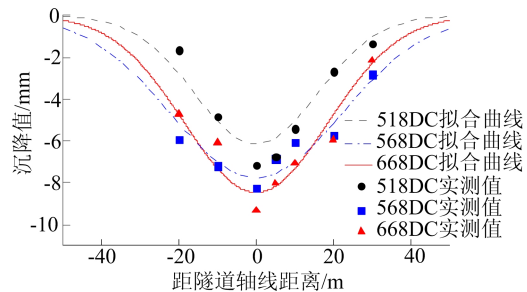


图 8 全砂层拟合曲线与实测值对比

同理, 对表 2 中盾构穿越软硬复合层的 3 个断面的监测数据进行线性回归处理, 得到拟合参数见表 5 所列。

由表 5 可知, 线性相关系数 $R > r_{0.05}(n-2) = 0.754$, 但是均小于 $r_{0.01}(n-2)$, 说明监测数据与回归方程的线性关系显著。

同理, 将常数项 \hat{a} 和线性系数 \hat{b} 代入式(5)中可以得到 3 个软硬复合层断面的线性回归方程, 线性回归结果如图 9 所示。

通过与监测数据的对比可以看出, 相较于对全断面砂层断面地表沉降数据进行线性回归的效果, 复合地层的 3 个断面地表沉降数据的线性回归效果较差。

表 5 软硬复合层断面拟合参数

断面	S_{xx}	S_{xy}	S_{yy}	\hat{a}	\hat{b}	R
915DC	155 312.5	440.700	1.937	2.008 7	0.002 8	0.804
922DC	155 312.5	317.690	0.919	2.505 5	0.002 0	0.841
928DC	155 312.5	427.649	1.939	2.250 5	0.002 8	0.779

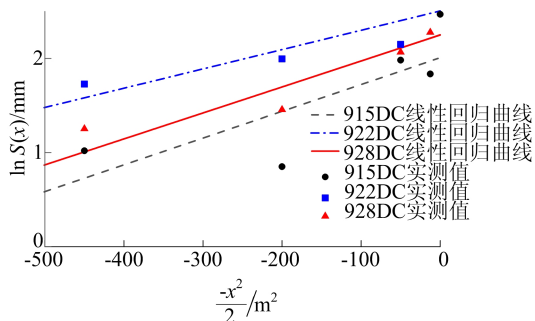


图 9 软硬复合层参数线性回归曲线

将 3 组线性回归方程中的常数项和线性系数分别代入式(11)、式(12)中,可以得到在软硬复合地层掘进时各断面的 Peck 拟合公式,软硬复合层 Peck 拟合曲线和实测值对比结果如图 10 所示。

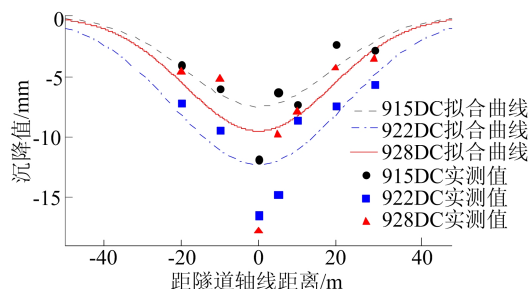


图 10 软硬复合层拟合曲线与实测值对比

表 6 全岩层断面拟合参数

断面	S_{xx}	S_{xy}	S_{yy}	\hat{a}	\hat{b}	R
960DC	155 312.5	634.913	3.242	1.002 9	0.004 1	0.895
970DC	155 312.5	433.216	1.509	1.400 8	0.002 8	0.895
980DC	155 312.5	233.781	0.480	1.758 5	0.001 5	0.857

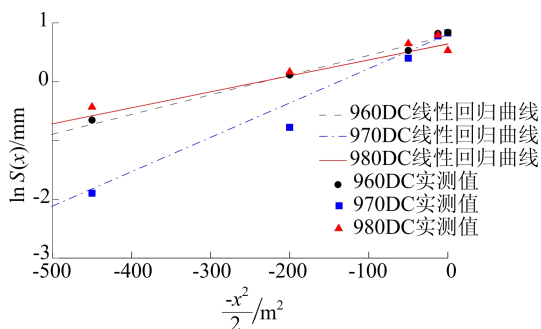


图 11 全岩层参数线性回归曲线

将 3 组 \hat{a} 、 \hat{b} 分别代入式(11)和式(12)可以得到对应的 3 组 S_{max} 和 i ,全岩层 Peck 拟合沉降曲

922DC 和 928DC 断面的地表沉降数据拟合较差,最大沉降值偏离拟合曲线最大沉降值较多,其中拟合曲线的最大沉降值与实际监测的最大沉降值差值分别为 4.37、4.19、8.26 mm,但是拟合曲线的最大沉降位置与实际监测沉降值一致,且沉降大小的分布仍然符合 Peck 拟合曲线的规律。考虑到实际盾构施工过程中对地表沉降产生影响的因素众多,其中出现实际监测数据远大于拟合曲线的最大沉降值的原因,可能是盾构机在停机更换刀具时,切口的压力过小,导致盾构机刀盘前方的地表沉降增加。

同理对盾构穿越全岩层的 3 个监测断面地表沉降数据进行处理,得到的回归方程相关参数见表 6 所列。

由表 6 可知,全岩层的 3 组监测数据进行线性回归后的相关系数 R 均大于 0.754,说明线性相关系数显著,其中 960DC 和 970DC 的线性相关系数大于 0.875,说明这两横断面的地表监测数据回归后线性相关系数高度显著。将 3 组 \hat{a} 、 \hat{b} 分别代入式(5)中,可以得到线性回归方程,回归方程与实测值的对比结果如图 11 所示,可以看出拟合效果较好。

线与实测值的对比结果如图 12 所示,可以看出 Peck 拟合曲线与实际地表沉降值接近。

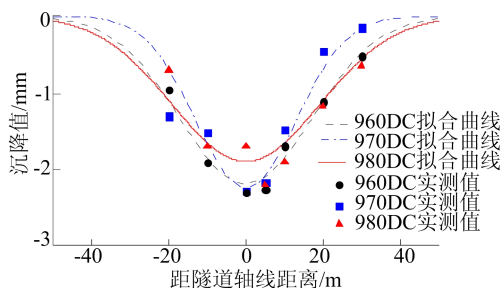


图 12 全岩层沉降值拟合曲线与实测值对比

5 Peck 经验公式修正

考虑到每种地层只取 3 组实测沉降数据得到的拟合系数离散性较大,因此在各地层选取 20 个断面的实测值进行拟合以获得地表沉降值范围,对拟合系数进行分析可得预测盾构掘进穿越 3 种不同地层对地表沉降影响的修正 Peck 经验公式。盾构掘进在 3 种不同地层的拟合系数如图 13 所示。其中在全砂层、软硬复合层及全岩层中 \hat{a} 的取值区间分别为 1.80~2.60, 2.00~3.00, 0.60~1.60, \hat{b} 的取值区间分别为 0.002 0~0.004 0, 0.001 8~0.002 8, 0.002 5~0.005 0。

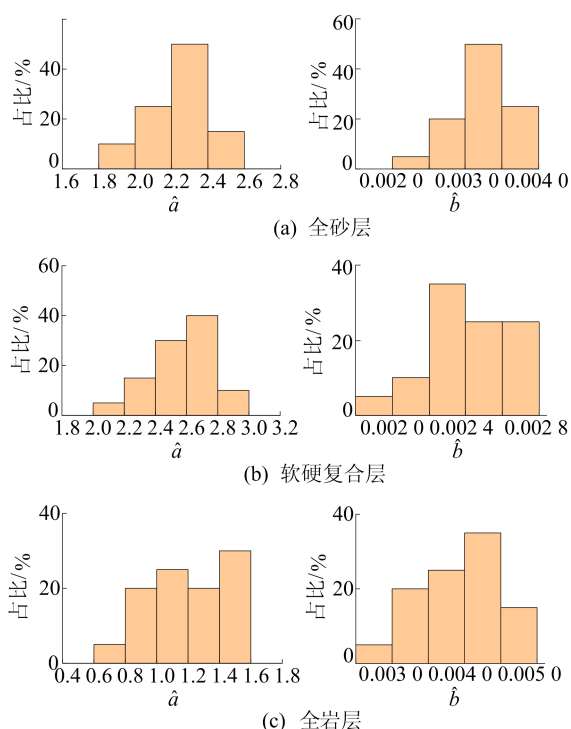


图 13 各断面回归常数项 \hat{a} 及线性系数 \hat{b}

由于数值模拟在各地层的计算结果拟合现场沉降数据较为准确,将各地层计算模型的模拟计算结果作为标准对 Peck 经验公式进行修正,将式(4)修改可以得到修正系数 α, β 关于 \hat{a}, \hat{b} 的关系式为:

$$\ln S(x_k) = \ln(\alpha S_{\max}) + \left(-\frac{x_k^2}{2}\right) \frac{1}{(\beta i)^2} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{e^{\hat{a}}}{S_{\max}}, \quad \beta = \frac{1}{i(\hat{b})^{0.5}} \quad (15)$$

由式(15)可以分别得到 3 种地层适用的 Peck 经验公式修正系数 α, β 的取值上下限,则修正系数 α 的 3 组取值范围分别为 0.912~1.360、0.674~1.228、0.744~1.355,修正系数 β 的 3 组

取值范围分别为 0.842~0.983、0.865~0.981、1.037~1.253。由修正系数取值上下限可知模拟计算的结果与实测的沉降数据拟合得较好,同时将 Peck 经验公式进行修正后可以对地表沉降进行更有效的预测。

5 结 论

本文依托芜湖城南过江隧道工程分析了盾构穿越复合地层时各横断面地表沉降监测数据,并利用数值模拟及拟合 Peck 经验公式的方法进行验证,通过引入修正系数 α, β 对 Peck 经验公式进行修正,得到以下结论。

1) 在大直径盾构穿越复杂地层的隧道施工中,分析不同地层掘进时的地表沉降监测数据与经验规律存在差异,其中盾构穿越软硬复合层时地表沉降远超其他 2 种地层,故要考虑实际施工过程中特殊情况的发生(如停机)以及盾构掘进参数的变化。

2) 基于实际工程参数建立的有限差分计算模型能够反映地表沉降规律,尽管全砂层和全岩层的模拟结果与监测数据基本一致,但是在穿越软硬复合层时监测数据与模拟值存在较大差距,考虑实际工程推进参数的变化及停机换刀头等情况的发生,改变数值模拟中盾尾注浆压力和掌子面附加推力后计算结果与监测数据较为一致,且符合经验规律。

3) 在考虑盾构穿越不同地层的施工中,基于经典的 Peck 经验公式拟合施工过程中的实际监测数据,拟合结果表明 Peck 经验公式可以较好地预测地表沉降。

4) 对盾构穿越不同地层引起地表沉降数据进行分析,通过引入 2 个修正系数,以数值模拟结果为标准,基于大量监测数据的统计分析提出了 Peck 经验公式的修正系数上下限,对 Peck 公式进行了修正。结果表明,修正后的公式可以更有效地描述盾构穿越不同地层引起地表沉降的规律。

本文以大直径盾构穿越不同地层引起地表沉降为研究对象,提出了适用于该工程的修正 Peck 经验公式。本文研究结果为后续工程的施工及类似工程的设计和施工提供参考。

[参 考 文 献]

[1] 李希元,闫静雅,孙艳萍. 盾构隧道施工工程事故的原因与

- 对策[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 968-971.
- [2] 韩焯, 李宁, STANDING J. 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.
- [3] 韩焯, 罗文林, 李宁. 地铁隧道施工引起沉降槽宽度的影响因素[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1188-1193, 1219.
- [4] 裴子钰, 杨新安, 邱冀, 等. 砂-黏复合地层盾构地表沉降分析及沉降槽宽度系数修正[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(9): 111-115.
- [5] ZHOU Z, DING H, MIAO L, et al. Predictive model for the surface settlement caused by the excavation of twin tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 114: 104014.
- [6] YANG X, LI Y. Research of surface settlement for a single arch long-span subway station using the Pipe-roof Pre-construction Method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 72: 210-217.
- [7] 袁侨蔚, 刘远明, 欧洵, 等. 上软下硬地层隧道盾构施工地表沉降影响因素及规律研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(2): 1-10.
- [8] 郑世杰, 杨锐, 马明杰, 等. 上软下硬复合地层双线平行隧道施工影响分析[J]. 公路, 2021, 66(8): 350-354.
- [9] 赵胤翔, 赵金昌, 郭治铁, 等. 富水粉细砂地层盾构施工引起地表沉降研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 918-924.
- [10] 骆冠勇, 钟森, 曹洪, 等. 砂土层中盾构掘进实测数据及数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊2): 563-574.
- [11] 龚晓南. 对岩土工程数值分析的几点思考[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 321-325.
- [12] 王俊, 何川, 胡瑞青, 等. 土压平衡盾构掘进对上软下硬地层扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 953-963.
- [13] HE C, FENG K, FANG Y, et al. Surface settlement caused by twin-parallel shield tunnelling in sandy cobble strata[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2012, 13(11): 858-869.
- [14] YANG J S, LIU B C, WANG M C. Modeling of tunneling-induced ground surface movements using stochastic medium theory[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(2): 113-123.
- [15] 吴昌胜. 大直径盾构隧道施工引起的地层变形研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [16] 张忠苗, 林存刚, 吴世明, 等. 泥水盾构施工引起的地面固结沉降实例研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(3): 431-440.
- [17] 林存刚, 张忠苗, 吴世明, 等. 软土地层盾构隧道施工引起的地面隆陷研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2583-2592.
- [18] 谢雄耀, 杨昌植, 王强, 等. 南京和燕路过江通道盾构穿越长江大堤的沉降分析及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊2): 3313-3322.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 226 页)

- [4] ZHAO Q, YAO Y, YAO W. GPS-based PWV for precipitation forecasting and its application to a typhoon event[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2018, 167: 124-133.
- [5] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(14): 15787.
- [6] YAO Y, ZHANG B, XU C, et al. Analysis of the global T_m - T_s correlation and establishment of the latitude-related linear model[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(19): 2340-2347.
- [7] EMARDSON T R, DERKS H J P. On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere[J]. Meteorological applications, 2000, 7(1): 61-68.
- [8] LANDSKRON D, BÖHM J. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92(4): 349-360.
- [9] SUN Z, ZHANG B, YAO Y. A global model for estimating tropospheric delay and weighted mean temperature developed with atmospheric reanalysis data from 1979 to 2017[J]. Remote Sensing, 2019, 11(16): 1893.
- [10] 黄良珂, 李琛, 谢劭峰, 等. 顾及垂直递减率的中国区域 T_m 格点产品空间插值研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(2): 295-300.
- [11] 韦海福, 陈天伟, 陈明. 顾及区域相对高程的中国区域加权平均温度模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(10): 1057-1062.
- [12] 高德恒, 张伟, 沈清华. 中国分区大气加权平均温度模型的建立与应用研究[J]. 人民珠江, 2022, 43(1): 119-126.
- [13] 岳赞, 卢光跃, 刘迪, 等. 基于等维新息的 GM(2,1) 递推预测模型[J]. 电信科学, 2017, 33(5): 55-61.
- [14] 聂徽晨, 胡伍生, 朱明晨, 等. 中国区域加权平均温度的时空分析及模型研究[J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 159-164.

(责任编辑 吴亮)