

基于 Peck 公式的双线隧道地面沉降模型及参数研究^{*}师 刚^{1,2} 袁浩旭³ 张澄玄¹ 宋建学³

(1. 上海同岩土木工程科技股份有限公司, 200092, 上海; 2. 上海地下基础设施安全检测与养护装备工程技术研究中心, 200092, 上海;

3. 郑州大学土木工程学院, 450003, 郑州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 双线平行盾构施工中, 引起地面沉降的因素有很多, 主要包括两隧道间距、隧道埋深、隧道直径、土质条件、施工方案和施工水平等。依托处于郑州地区典型地质单元的双线隧道盾构施工地表沉降监测数据, 在 Peck 公式的基础上, 建立起地表沉降分布函数关系; 通过对实测数据进行拟合分析, 得出沉降槽宽度系数和土体损失率等参数的数值。研究发现: 在隧道间距一定的情况下, 埋深较小时, 地面沉降曲线呈双峰 W 型, 此时可用修正过的二维 Peck 公式进行拟合; 当隧道埋深较大时, 地面沉降曲线呈 V 型, 用经典 Peck 公式进行拟合即可满足工程精度要求。

关键词 U231+3 地铁; 双线平行隧道; 盾构施工; Peck 公式; 地表沉降; 数据拟合

中图分类号

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.01.030

Study on Ground Settlement Model and Parameters of Twin-line Tunnel Based on Peck Formula

SHI Gang, YUAN Haoxu, ZHANG Chengxuan, SONG Jianxue

Abstract In the construction of twin-line parallel shield tunnel, many factors are causing surface settlement, such as the distance between two tunnels, tunnel depth, tunnel diameter, geological condition, construction procedure and level. On the basis of ground settlement monitoring data of twin-line shield excavation of typical geological units in Zhengzhou and Peck formula, ground settlement distribution function relationship is established. Through fitting analysis of field data, values of parameters including width of settlement trough and soil loss rate are obtained. Study finds that, under the condition of fixed distance between tunnels, ground settlement curve demonstrates W shape when the tunnel depth is relatively shallow, which can be fitted by using the revised 2D Peck formula; when the tunnel is relatively deeper, ground settlement curve demonstrates V shape, which can be fitted by using classic

Peck formula to meet the engineering accuracy requirement.

Key words metro; twin-line parallel tunnel; shield construction; Peck formula; ground surface settlement; data fitting

First-author's address Shanghai Tongyan Civil Engineering Science and Technology Co., Ltd., 200092, Shanghai, China

在地铁隧道施工中, 地表沉降变形是不可避免的, 严重时可能会导致上方地面塌方。与单线隧道相比, 双线隧道的沉降变形更难预测, 发生事故时造成的后果也更为严重, 所以有必要对双线隧道的地表沉降模型进行研究分析, 确定具体地质单元中相应计算参数, 为工程实践提供评估依据。

1969 年, Peck^[1] 基于大量实测数据统计结果, 认为土体移动由土体损失引起; 在假设土体不排水和沉降槽体积等于土体损失体积的条件下, 提出地面沉降槽呈正态分布, 由此提出了著名的 Peck 公式。在双线平行隧道中, 国内外很多专家对 Peck 公式进行了修正与补充。文献[2]通过对先行隧道、后行隧道引起的沉降分别进行计算, 然后叠加得到双线平行隧道沉降的三维土体沉降分布; 文献[3]主要研究了双孔平行隧道施工诱发地表横向及纵向变形的修正 Peck 法与随机介质法, 开发出了地铁隧道施工诱发地层环境损伤预测评价与控制设计的 STEAD 系统; 文献[4]基于双线水平平行盾构施工中土体损失引起的土体变形二维解析解, 建立了土体变形三维解析解, 其方法能够计算土体深层沉降和水平位移, 能较精确地反映土体三维变形; 文献[5]对现有双线平行盾构施工引起的地面沉降方法进行了综述, 建立了修正的二维 Peck 公式, 用以计算深层双线平行隧道的沉降。

本文在文献[5]修正二维 Peck 公式的基础上, 针对郑州地区特有地质条件, 结合实测数据, 采用拟合分析方法对理论公式进行反演分析, 求出隧道

^{*} 国家自然科学基金项目(41602297)

沉降槽宽度系数以及土层损失率。

1 经典 Peck 模型及参数

Peck 认为隧道开挖产生地表沉降横向分布近似为正态分布曲线,并给出地表沉降预测公式:

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

$$S_{\max} = \frac{V_i}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{V_i}{2.5i} \quad (1)$$

式中:

$S(x)$ ——距离隧道中心轴线为 x 处地表沉降值, m;

i ——地表沉降槽宽度系数, m;

S_{\max} ——隧道中心线处地表最大沉降量, m;

V_i ——土体损失率,即隧道施工中实际开挖土体的体积与竣工隧道体积的差值,竣工隧道体积包括隧道周边包裹的压入浆体体积, m^3 。

Peck 模型曲线近似呈 V 型,但在实际工程中,双线平行盾构隧道施工引起的地表沉降曲线有时候呈 W 型,此时经典 Peck 公式已不适用,需要有新的模型。

2 二维 Peck 模型

根据经典 Peck 公式,基于地下开挖引起的地表沉降横向分布近似为正态分布曲线,依据工程实测数据即可反演公式中相关参数。但是在实际的地铁隧道施工中,由于隧道埋深、两隧道水平间距和施工步序等的不同,两条隧道之间的影响程度也不同。在 Peck 公式基础上,文献[5]提出了针对双线平行隧道的二维 Peck 模型。该地表沉降预测公式为:

$$S(x) = S_{\max} \left\{ \exp \left[\frac{-(x-0.5L)^2}{2i^2} \right] + \exp \left[\frac{-(x+0.5L)^2}{2i^2} \right] \right\}$$

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

式中:

$S(x)$ ——距离两隧道中轴线 x 处地表的沉降值, m;

i ——双线平行隧道盾构施工引起的沉降槽宽度系数, m;

η ——双线平行隧道盾构施工时的土体损失率;

R ——盾构半径, m;

L ——两隧道中线间距, m。

本文根据此修正的双线平行隧道二维 Peck 模型,针对郑州郑东新区和航空港区的典型地质单元,结合地铁隧道施工地表沉降监测结果进行反演分析,分别求出参数 i 和 η 等具体参数。

3 工程实例及参数反演

3.1 郑州东区典型区间沉降监测及参数反演

郑州地铁 4 号线农业东路站—如意湖北站区间位于郑东新区。本区间采用土压平衡盾构施工。本区间地面地形较平坦,为道路和绿化带,道路两旁有简易房等临时建筑,地面高程位于 86.09~89.35 m 之间,地貌单元属黄河冲积平原。区间隧道下穿昆丽河。场地勘探揭露 56 m 深度范围内地层自上而下依次由人工填土层、第四系全新世冲积层、第四系上更新世冲积层、第四系中更新世冲积层等构成。勘察期间稳定地下潜水水位埋深介于 8.3~12.0 m (水位高程为 77.7~78.1 m),地下水类型为第四纪松散岩类潜水。地下水主要赋存于细砂、黏质粉土、粉土和粉质黏土层中。

本区间隧道埋深 H 为 13~25 m,隧道半径 R 为 3 m。地表沉降监测点布设:距离左、右线隧道中心线 0 m、5 m、10 m 和 15 m 分别布设沉降监测点,一个断面布设 13 个监测点;直线段每 10 m 布设一个断面,曲线段每 5 m 布设一个断面。选取两个典型断面 DB-2 和 DB-15 进行研究。

断面 DB-2 处隧道埋深为 14 m,根据监测数据绘制地表沉降曲线,地表沉降大致呈 W 型。左线隧道和右线隧道中轴线处地表沉降最大,达到 22 mm 左右,往两侧递减,与 Peck 最初所设想的一样;两隧道中线处地表沉降达到 20 mm 左右。

对实测数据进行拟合,实测数据与拟合结果对比曲线如图 1 所示,拟合曲线表达式为:

$$S(x) = 18.4 \left\{ \exp[-0.0078(x-9)^2] + \exp[-0.0078(x+9)^2] \right\} \quad (3)$$

经反演得出: $i = 8$ m, $\eta = 0.013$ 。

同一区段断面 DB-15 处隧道埋深为 25 m,隧道半径和两隧道间距与断面 DB-2 的相同。

断面 DB-15 处的地表沉降实测数据曲线大致为 V 型,与经典 Peck 模型更为接近。对实测数据进行拟合,实测数据与拟合数据对比曲线图如图 2 所示,拟合曲线表达式为:

$$S(x) = 18.09 \exp(-0.005x^2) \quad (4)$$

经反演得出: $i = 10$ m, $\eta = 0.016$ 。

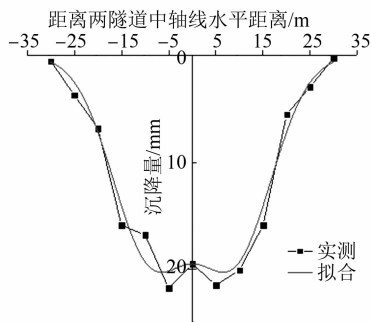


图 1 断面 DB-2 实测数据与拟合数据对比图

Fig. 1 Comparison of measured data and fitted data of section DB-2

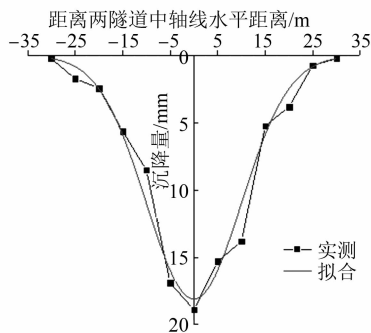


图 2 断面 DB-15 实测数据与拟合数据对比图

Fig. 2 Comparison of measured data and fitted data of section DB-15

两个典型断面的地表沉降分布虽然有所不同,但地层损失率却很相近,表明同一区间的施工机械、队伍相同,施工水平恒定。

3.2 郑州港区典型区间沉降监测及参数反演

郑州地铁机许线双鹤湖站—双鹤湖南站地貌单元属条形垄岗洼地,本区间穿越的主要地层为:细砂和粉质黏土,局部含有少量钙质胶结。地下水主要为第四系松散堆积物孔隙潜水,勘察期间地下水埋深约 3.7~10.2 m 相应水位标高为 102.40~104.40 m。该区间施工共使用两台土压平衡盾构机,1[#]、2[#]盾构机掘进方向为从双鹤湖南站北端头始发至双鹤湖站,在双鹤湖站南端头吊出。

该区间隧道埋深 H 为 13~26 m,盾构半径 R 为 3 m。选取两个典型断面 DB-20 和 DB-8 进行研究。

DB-20 断面处隧道埋深为 15 m,根据现场实测数据绘制地表沉降曲线,曲线大致呈 W 型。左线隧道和右线隧道中轴线处地表沉降最大,往两侧递减。两隧道中线处地表沉降达到 17 mm 左右。

对实测数据进行拟合,实测数据与拟合数据结果对比曲线图如图 3 所示,拟合曲线表达式为:

$$S(x) = 15.16 \{ \exp[-0.007(x-9)^2] + \exp[-0.007(x+9)^2] \} \quad (5)$$

经反演得出: $i=8.2$ m, $\eta=0.011$ 。

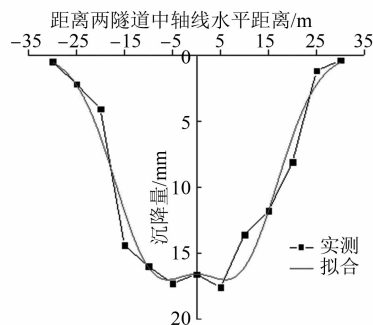


图 3 断面 DB-20 实测数据与拟合数据对比图

Fig. 3 Comparison of measured data and fitted data of section DB-20

断面 DB-8 隧道埋深为 26 m,其地表沉降曲线显示为 V 型,线路中线处地表沉降最大,达到 15 mm 左右,往两侧递减,与经典 Peck 模型更为接近。对实测数据进行拟合,实测数据与拟合数据结果对比曲线图如图 4 所示,拟合曲线表达式为:

$$S(x) = 15.07 \exp(-0.002x^2) \quad (6)$$

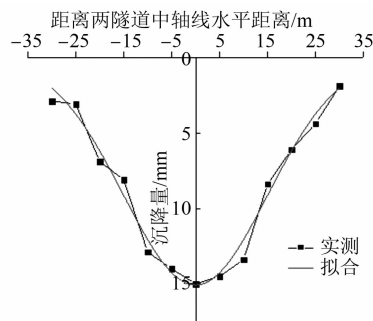


图 4 断面 DB-8 实测数据与拟合数据对比图

Fig. 4 Comparison of measured data and fitted data of section DB-8

拟合曲线与经典 Peck 模型基本符合,处理方法和郑州东区断面 DB-15 处一样。经反演得出: $i=15$ m, $\eta=0.020$ 。

基于参考文献[9-10]等研究成果,本文将郑州市区分为 3 个工程地质单元(见图 5)。根据表 1~3 的数据可认为,这 3 个地质单元具有不同的岩土特征,因此在不同地质单元内进行盾构施工的参数也具有不同的特点。如图 5 所示,Ⅰ区位于郑州市的东北部,Ⅱ区位于东南部,Ⅲ区位于西部。Ⅰ区和Ⅱ区分界线为东大街和郑汴路;Ⅱ区、Ⅲ区分界线为京广路;Ⅰ区和Ⅲ区分界线为西开发区瑞达路、化工

表 1 郑州市 I 区土层条件与盾构掘进参数对应关系

Tab. 1 Corresponding relationship between soil conditions and shield tunneling parameters in Zhengzhou District I								
埋深/m	土层条件	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	刀盘开口率/%	盾构推力/t	刀盘扭矩/(kNm)	土仓压力/MPa	每环注浆量/(m³/环)
11.6~13.0	粉质黏土占 65%,粉砂占 35%	12.8	19.4	60	1 450±100	2 500±200	0.125±0.01	6.70±0.50
13.0~15.5	粉质黏土占 90%,粉砂占 10%	16.6	17.3	60	1 550±100	2 800±300	0.140±0.02	6.00±0.50
13.0~15.5	粉质黏土占 65%,粉砂占 35%	12.8	19.4	60	1 450±100	2 400±200	0.125±0.01	6.60±0.30
15.5~19.0	粉质黏土占 65%,粉砂占 35%	12.8	19.4	60	1 550±100	3 000±400	0.140±0.02	6.30±0.50
19.0	粉砂占 50%,粉质黏土占 25%,粉土占 25%	6.1	30.1	63	2 900±200	2 600±200	0.155±0.01	3.80±0.30
19.0~19.9	粉质黏土占 33%,粉砂占 33%,细砂占 34%	6.9	25.4	60	1 750±100	3 200±300	0.145±0.02	5.60±0.50
19.0~21.3	粉砂占 70%,粉土占 30%	4.0	32.0	63	3 300±300	2 900±300	0.150±0.02	3.75±0.50
21.3~33.0	粉砂		33.5	63	3 200±400	2 800±600	0.160±0.05	3.80±0.80

表 2 郑州市 II 区土层条件与盾构掘进参数对应关系

Tab. 2 Corresponding relationship between soil conditions and shield tunneling parameters in Zhengzhou District II								
埋深/m	土层条件	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	刀盘开口率/%	盾构推力/t	刀盘扭矩/(kNm)	土仓压力/MPa	每环注浆量/(m³/环)
12.2~16.0	粉质黏土	26	17.0	50	1 500±200	2 650±400	0.14±0.05	6.5±0.5
16.0~20.8	粉质黏土	26	17.0	50	1 600±400	2 700±500	0.15±0.05	6.5±0.6
20.8~21.4	粉质黏土	26	17.0	50	1 600±200	2 850±300	0.16±0.05	6.8±0.3
20.8~21.4	细砂占 90%,粉质黏土占 10%	2.6	28.7	50	2 000±300	3 300±300	0.16±0.04	6.3±0.5
21.4~28.0	粉质黏土	26	17.0	50	1 800±400	2 900±400	0.17±0.05	6.6±0.5

表 3 郑州市 III 区土层条件与盾构掘进参数对应关系

Tab. 3 Corresponding relationship between soil conditions and shield tunneling parameters in Zhengzhou District III								
埋深/m	土层条件	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	刀盘开口率/%	盾构推力/t	刀盘扭矩/(kNm)	土仓压力/MPa	每环注浆量/(m³/环)
30~32	粉质黏土	33	18.5	33	1 400±300	2 700±500	0.22±0.06	5.5±0.3
32~35	粉质黏土	33	18.5	33	1 550±100	3 000±400	0.24±0.06	5.4±0.4

路和南阳路。其中,东区农业东路站—如意湖北站位于 I 区,港区双鹤湖站—双鹤湖南站位于 II 区。

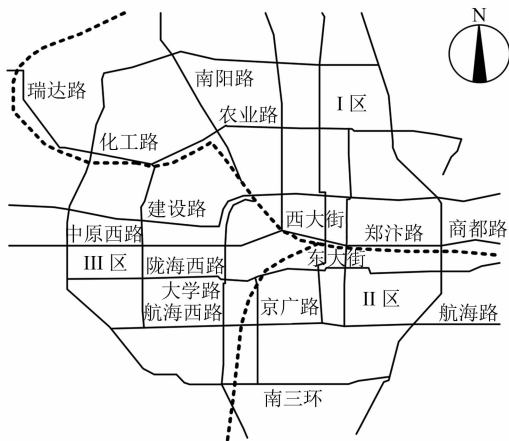


图 5 郑州市区工程地质单元划分示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the division of engineering geological units in Zhengzhou urban area

各断面地表沉降槽宽度系数与土体损失率汇总如表 4 所示。I 区和 II 区地质特征如表 5 和表 6 所示。

表 4 地下工程地表沉降槽宽度系数与土体损失率

Tab. 4 Width coefficient of ground surface settlement trough and soil loss rate in underground engineering					
断面	隧道埋深/m	i/m	η	地表沉降曲线形状	所在区域
DB-2	14	8	0.013	W 型	I 区
DB-15	25	10	0.016	V 型	I 区
DB-20	15	8.2	0.011	W 型	II 区
DB-8	26	15	0.020	V 型	II 区

4 结论

1) 本文所选择的断面地层性质相近、施工队伍相同,在这种前提下,当盾构隧道埋深大于 25 m 时,地面沉降曲线呈单峰 V 型,地表沉降可使用经典 Peck 公式进行计算;当盾构隧道埋深小于 15 m 时,地面沉降曲线呈双峰 W 型,地表沉降可使用修正的二维 Peck 公式进行计算。隧道深度在 15~25 m 之间时,地面沉降曲线规律不明确,与具体地层性质和施工控制有关。

2) 郑州典型地质单元的盾构隧道地面沉降参考指标建议值如下:东区地貌单元属于黄河冲积平原,盾构隧道地表沉降曲线为 V 型时, i 为 10 m, η

表 5 郑州市 I 区工程地质特征

Tab. 5 Engineering geological characteristics of Zhengzhou District I

土层	层底深度/m	重度/(kN/m ³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	承载力特征值/kPa	压缩模量/MPa
粉土	6~8	19.6~20.2	9~18	15.5~26.5	85~110	3.6~5.7
粉土与黏性土互层	15~19	17.9~19.9	11~35	10.7~20.6	90~130	5.1~9.2
粉砂	28~33	20.2~25.2	0	19.1~25.4	190~260	16.0~22.0

表 6 郑州市 II 区工程地质特征

Tab. 6 Engineering geological characteristics of Zhengzhou District II

土层	层底深度/m	重度/(kN/m ³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	承载力特征值/kPa	压缩模量/MPa
粉土	2~3	17.6~18.0	9.0~16.0	20~25	100~120	4.8~6.5
粉砂	3~6	5.3~20.7	5.9~28.4	4~30	110~120	9.5~10.0
粉土	7~10	16.0~21.0	3.0~35.0	0~26	130~150	7.8~10.5
粉砂	12~16	17.1~21.6	6.0~30.0	5~29	140~170	11.2~15.5
粉质黏土与细砂互层	>16	18.0~20.7	5.0~60.0	8~22	140~170	11.2~15.5

为 0.016;沉降曲线为 W 型时, i 为 8 m, η 为 0.013。郑州港区地貌单元属于条形垄岗洼地,沉降曲线为 V 型时, i 为 15 m, η 为 0.020;沉降曲线为 W 型时, i 为 8.2 m, η 为 0.011。

3) 土体损失率不但和地层条件有关,还与同步注浆及二次注浆等施工因素有关。在同步注浆和二次注浆基本相同的条件下,土压平衡盾构掘进引起的地层损失率在 0.01~0.02 之间,这可以作为施工质量评定的参考指标。

参考文献

[1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C] //Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City:Sociedad Mexicana de Macánica de Suelos,1969:225.

[2] 陈春来,赵城丽,魏纲,等. 基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J]. 岩土力学,2014(8):2212.

CHEN Chunlai,ZHAO Chengli,WEI Gang,et al. Prediction of soil settlement induced by double-line shield tunnel based on Peck formula[J]. Rock and Soil Mechanics,2014(8):2212.

[3] 刘波,陶龙光,丁城刚,等. 地铁双隧道施工诱发地表沉降预测研究与应用[J]. 中国矿业大学学报,2006(3):356.

LIU Bo,TAO Longguang,DING Chenggang,et al. Prediction for ground subsidence induced by subway double tube tunneling [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006(3):356.

[4] 魏纲,庞思远. 双线平行盾构隧道施工引起的三维土体变形研究[J]. 岩土力学,2014(9):2562.

WEI Gang,PANG Siyuan. Study of three-dimensional soil deformation caused by double-line parallel shield tunnel construction[J]. Rock and Soil Mechanics,2014(9):2562.

[5] 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(2):63.

WU Huajun,WEI Gang. The calculation of soil settlement induced by construction of twin parallel shield tunnels with a small-interval [J]. Modern Tunneling Technology, 2014 (2):63.

[6] 徐路畅,芮瑞,张龙,等. 基于 Trapdoor 试验的双线隧道地表沉降预测公式探讨[J]. 岩土工程学报,2017(8):1470.

XU Luchang,RUI Rui,ZHANG Long,et al. Prediction formula for surface settlement in double-line tunnel based on Trapdoor tests[J]. Rock and Soil Mechanics,2017(8):1470.

[7] 魏纲. 盾构法隧道地面沉降槽宽度系数取值的研究[J]. 工业建筑,2009(12):74.

WEI Gang. Study on calculation for width parameter of surface settlement trough induced by shield tunnel[J]. Industrial Construction,2009(12):74.

[8] 孙永玉,周顺华,宫全美. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报,2009(3):500.

SUN Yuyong,ZHOU Shunhua,GONG Quanmei. Distribution of deep displacement field during shield tunneling in soft-soil areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009(3):500.

[9] 王荣彦. 郑州市区工程地质条件及问题探讨[J]. 岩土工程界,2006(12):71.

WANG Rongyan. Discussion on engineering geological conditions and problems in Zhengzhou urban area[J]. Mineral Exploration,2006(12):71.

[10] 卜令方,金忠良,汪明元. 杭州市平原地区的工程地质分区[J]. 科技通报,2018(4):62.

BU Lingfang,JIN Zhongliang,WANG Mingyuan. Engineering geological zoning of the plain area of Hangzhou[J]. Bulletin of Science and Technology,2018(4):62.

(收稿日期:2020-02-21)