

浅埋矩形顶管施工引起的地层沉降变化规律^{*}桂 林¹ 任睿祺² 史培新² 刘 维²

(1. 苏州轨道交通集团有限公司, 215004, 苏州; 2. 苏州大学轨道交通学院, 215131, 苏州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 以苏州轨道交通 5 号线某车站过街通道工程为例, 应用现场监测及对比分析的方法, 研究城市浅埋矩形顶管施工造成的地表沉降变化规律。研究结果表明: 浅埋式矩形顶管顶进过程中地表变形经历了微扰动沉降、迅速沉降、注浆抬升、固结沉降四个阶段; 顶管施工沿顶管轴线方向引起土体沉降的范围大致为距掘进面 7.5 m 以内区域; 顶管施工造成的地表沉降范围横向宽度大致为顶管截面宽度的 3 倍。将现有理论预测公式与实测数据对比, 结果表明: Peck 公式以及随机介质理论均可用于预测浅埋矩形顶管施工造成的地表沉降。对既有案例进行对比统计, 通过量纲一化分析得到沉降槽分布规律。

关键词 浅埋隧道; 矩形顶管; 地层沉降

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.017

Variation Law of Ground Subsidence Induced by Shallow-buried Rectangular Pipe Jacking Construction

GUI Lin, REN Ruiqi, SHI Peixin, LIU Wei

Abstract Taking the engineering of a station underground passageway of Suzhou Rail Transit Line 5 as example, by adopting site monitoring and comparative analysis methods, the variation law of ground subsidence induced by urban shallow-buried rectangular pipe jacking construction is studied. Results show that during the shallow-buried rectangular pipe jacking process, the ground surface deformation consecutively undergoes four phases: slight disturbance and subsidence, dramatic subsidence, grouting uplift and consolidation subsidence. In the direction along pipe jacking axis, ground subsidence is observed in an area within 7.5 m around the excavation face. Pipe jacking construction causes the ground subsidence width to be about three times of the pipe section width. By comparing existing theoretical prediction formula and in-situ monitoring data, results show that both Peck formula and stochastic medium model can be used to predict the ground subsidence induced by shallow-buried rectangular jacked tunnels. By comparative

statistics of existing cases, the subsidence trough distribution patterns are concluded with normalization analysis.

Key words shallow-buried tunnel; rectangular pipe jacking; ground subsidence

First-author's address Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., 215004, Suzhou, China

0 引言

浅埋矩形顶管施工技术以其施工噪声低、环境污染小、施工用地少、开挖面积小的优势成为了城市浅埋隧道施工的重要选择。隧道开挖必然会打破原有土层的应力平衡, 引起周围土体产生变形。

顶管施工引起地面变形的计算方法从圆形的盾构隧道施工相关理论发展而来, 主要有以 Peck 公式为主的经验法、以 Mindlin 解和随机介质理论为代表的理论分析法、数值模拟法等。在理论方法中, 随机介质理论因其具有可以考虑隧道断面形状、变形模式等的优点而被迅速推广, 并应用至矩形顶管施工引起的地面变形计算中。

在此基础上, 许多学者针对顶管施工引起的地面变形进行了监测研究。文献[1]对内蒙古科技大学地下过街通道工程进行了地表沉降监测研究, 文献[2]对南宁地铁 1 号线金湖广场站 3 号出入口过街通道工程进行了地表沉降监测研究, 文献[3]对上海轨道交通 2 号线张江高科站 1 号出入口矩形顶管穿越工程进行了地表沉降监测研究。各研究结果表明, 地表横向沉降曲线以顶管轴线为对称轴呈正态分布。但关于顶管施工的主要影响范围尚未达成统一结论。

相较于圆形盾构隧道, 矩形顶管隧道往往具有较大的影响范围和地表沉降。经分析, 由于矩形顶管隧道通常埋深浅, 且管节顶部与土体接触面几乎是一个平面, 故矩形顶管机在顶进过程中, 其上部

* 国家自然科学基金项目(51978430); 苏州轨道交通集团有限公司科技项目(SZZG06YJ6000014)

卸荷拱高度以内的土体约束较弱,使得土体直接坍塌在顶管机上方,形成较大、较宽的地表沉降槽,并使顶管机顶进困难。该现象被称为“背土效应”^[4-5]。若将顶管周围土体按图 1 划分,则在原有研究成果与工程经验的基础上不难得出:管节范围正上方的土体(Ⅰ区)是受施工影响最大的区域^[6]。

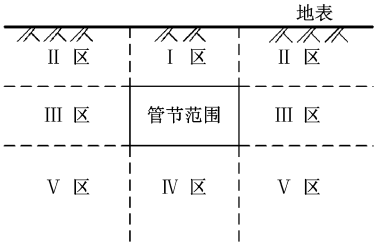


图 1 顶管周围土体区域划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil area division around pipe jacking

文献[7]在此基础上提出了整体背土效应理论,认为随着顶管顶程逐渐增大,其正上方土体与管节接触面积越来越大,造成正上方土体与管节的总摩擦阻力越来越大,超出了周边土体的整体约束能力,从而导致正上方土体伴随管节整体位移的突发破坏现象。背土效应还可能导致顶管尾端地面下沉及前端被动隆起。

由此可见,矩形顶管法隧道施工引起的地表变形的机理是多方面的。为了研究矩形顶管施工对地面变形的具体影响,本文以苏州轨道交通 5 号线(以下简为“苏州 5 号线”)某车站过街通道顶管工程为例,通过对施工引起的地表沉降进行现场监测,并利用现有理论对监测数据进行分析,得到此类工程施工引起的地表沉降变化规律。

1 工程概况

苏州 5 号线某车站过街通道工程采用矩形顶管法施工,掘进长度为 61.8 m,覆土深度约为 4.42 ~ 5.09 m。施工机械工作面尺寸为 6.93 m × 4.23 m 的多刀盘土压平衡式矩形顶管机(工作断面如图 2 所示)。管节如图 3 所示。通过计算可得,地层损失率 V_1 (顶管管片截面面积与顶管机截面面积比值)为 1.14%。顶管机截面与顶管管片截面之间的平均间隙 $\Delta d = 15\text{ mm}$ 。

场地地层分布情况如图 4 所示。顶管主要穿越土层为①₁层、③₁层、③₃层,其中③₃层为微承压

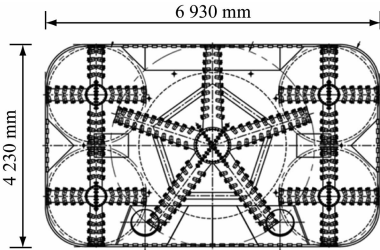


图 2 工作断面正视图
Fig. 2 Front view of working section

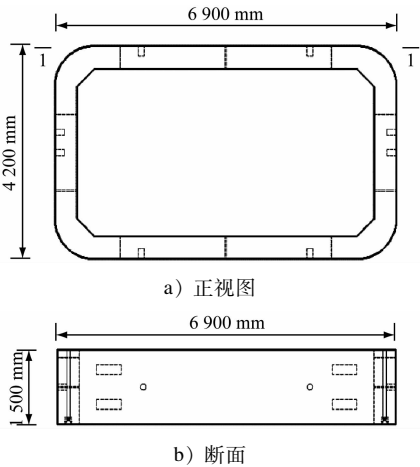


图 3 顶管管片示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pipe jacking segment

水层。该地区平均地下水位为 -3.91m,潜水主要赋存于填土和浅层黏性土中,属孔隙型潜水,富水性较差。微承压水主要赋存于第③₃层、④₂层及⑤₂层中,④₂层渗透性强,含水量较为丰富。整体工程施工场地内具有地下水位高、管线密布等特点,对地表沉降的控制要求很高。各土层物理力学参数如表 1 所示。

表 1 各土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer						
土层	土体	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	压缩 模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	渗透系数 $k/(\text{cm}/\text{s})$
① ₁ 层	填土	19.1	3.96			7.58×10^6
③ ₁ 层	黏土	19.0	5.44	4	31.4	3.07×10^6
③ ₃ 层	黏质粉 土夹粉 质黏土	18.6	6.87			4.99×10^5
④ ₂ 层	粉砂	19.1	10.40			5.37×10^4
⑤ ₁ 层	粉质 黏土	18.6	5.82	5	32.7	2.63×10^6

注: c 、 φ 为有效应力指标。

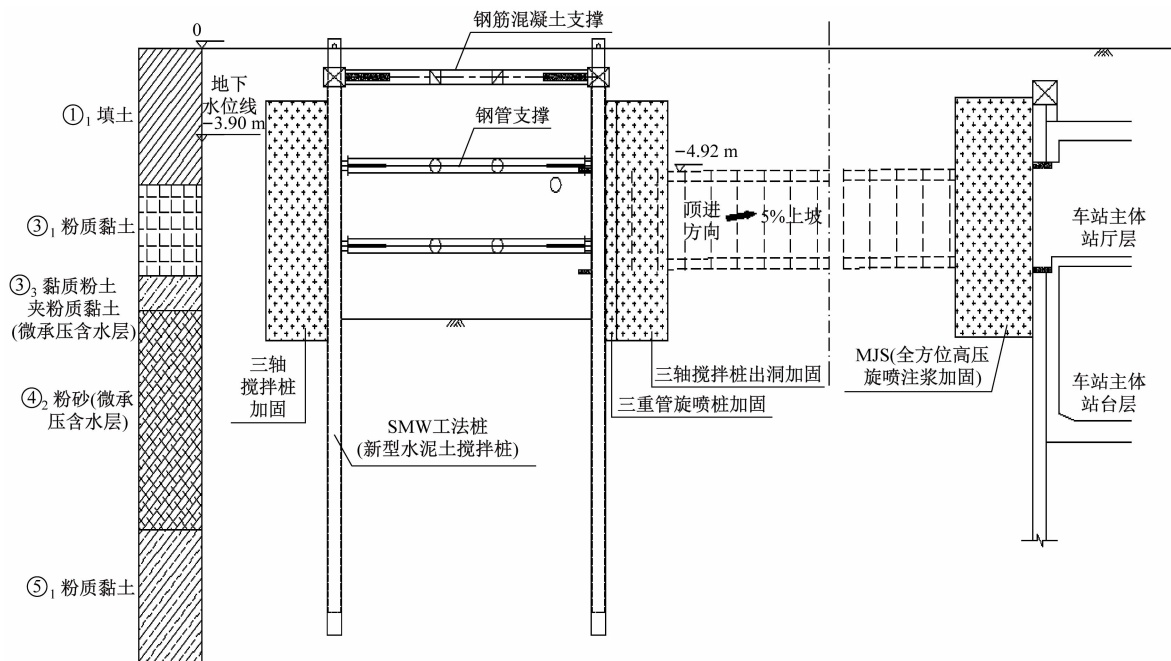


图4 场地地层分布情况
Fig.4 Site stratigraphic distribution

经验表明,在土体及管节参数一定时,防止顶管施工发生破坏的关键是控制管土摩擦系数 μ_i 及管土黏聚力 c_i 。为保证施工质量、控制地表沉降,在顶进过程中,需通过压浆环管向节外壁压注一定数量的减摩泥浆,并采用多点对称压注使泥浆均匀地填充在管节外壁和周围土体间的空隙,来减少管节与土体间摩擦力,起到降低顶进阻力的效果。施工过程中,注浆压力控制范围为68.04~155.16 kPa;注浆量为1.00~1.67 m³/节;土仓压力值设置为0.10~0.12 MPa。

2 现场监测

为了研究顶管顶进施工过程中对地表扰动的情况,以顶管顶进中心轴线为对称轴,选择监测断面 K1、K2(拼装至 29 环及 36 环)分别布设 5 个监测点(如图 5 所示),对整个顶管施工过程进行监测。

本次顶管施工整体为匀速顶进;在拼装至 27 环时,因物料问题暂停施工;拼装至 37 环时,因将顶出 MJS (全方位高压旋喷注浆)加固区,施工速度较慢。

2.1 顶管轴线位置监测点地表沉降变化

图6及图7为顶管顶进引起K1、K2监测断面的地表位移(负值为沉降,正值为隆起)。其中K2-1监测点由于在施工过程中部分时间被占用,故未测得该点的部分数据。观察发现:①K1、K2断面的5个测点的沉降规律基本一致;②较同断面其他测点

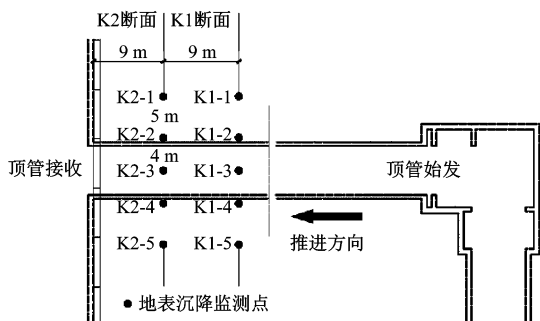


图5 地表沉降监测点布置示意图

Fig.5 Schematic diagram of the layout of surface subsidence monitoring points

来说,K1-3 和 K2-3 两个位于轴线处的测点沉降较大;③K1 断面中,K1-1 与 K1-5、K1-2 与 K1-4 两组沉降变化规律相似,符合整个工程沿顶管轴线位置大致对称的规律;④测点 K2-2 与 K2-4 沉降略有差距,可能是由测点布置不完全对称而导致的。

从图 8 中可以发现,固定断面随顶管顶进的沉降变化主要分为 5 个阶段:①当顶管机顶进至 A 段时,顶管对监测断面的影响较轻;②当顶管机顶进至 B、C 段时,土体主要受顶管顶力、开挖面支护压力共同作用,地表迅速沉降,沉降值约为 10 mm;③当顶管机顶进至 C 段时为机身通过的平缓段(顶管机身长约 4.0 m),土体既未受到土仓压力的挤压作用,也未受到同步注浆压力的影响,因此沉降没有

继续发展,此时地表沉降达到最大值;④当顶管机顶进至 C 段时,对管节超挖位置进行同步注浆导致地表被抬起,这是引起该段土体变形的主要原因;⑤当顶管机顶进至 D 段时,注浆完成后,土体由于固结作用产生沉降。

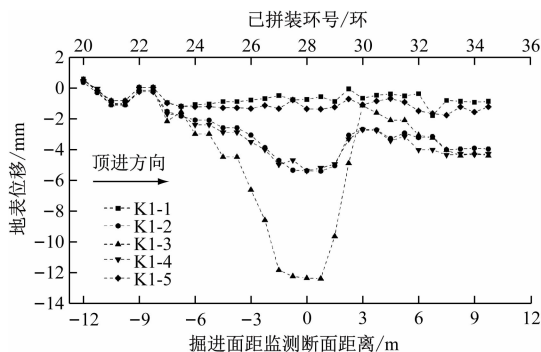


图 6 K1 断面地表位移

Fig. 6 Surface displacement of K1 section

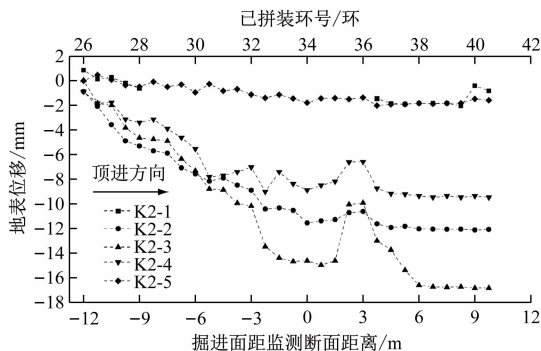


图 7 K2 断面地表位移

Fig. 7 Surface displacement of K2 section

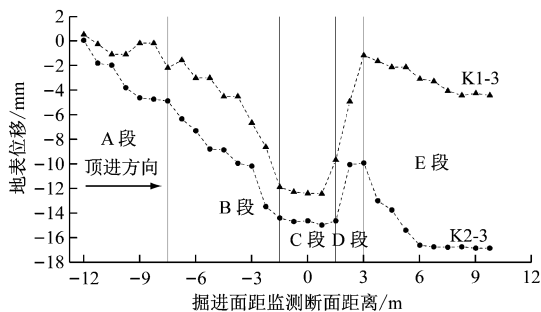


图 8 测点 K1-3 与 K2-3 随顶管顶进地表位移

Fig. 8 Surface displacement at measuring points K1-3 and K2-3 with pipe jacking

2.2 监测断面沉降槽

图 9 及图 10 为 K1、K2 监测断面处各测点顶管顶至不同位置时的沉降值,直观展示了顶管施工各阶段的沉降槽。沉降槽大致沿轴线对称,呈现中间位置沉降大,两侧沉降小的特点。观察 K1-1、K1-5、

K2-1、K2-5 四组测点可以发现,在顶管顶至不同位置时各测点沉降变化不大。这说明土体在距顶管轴线 9 m 处(即约 3 倍顶管截面宽度处)受到的影响已经很小。

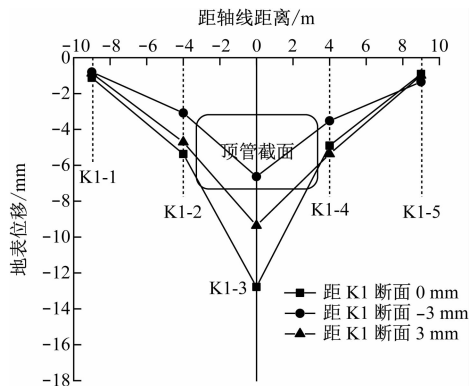


图 9 K1 断面沉降槽

Fig. 9 Subsidence trough at K1 section

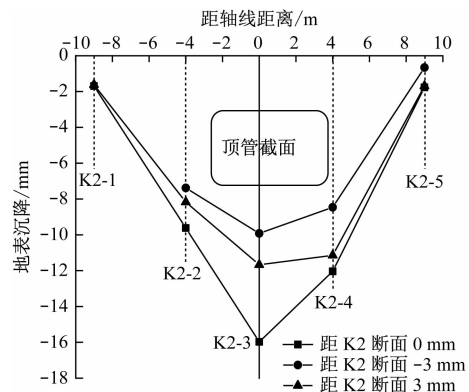


图 10 K2 断面沉降槽

Fig. 10 Subsidence trough at K2 section

3 监测数据分析

3.1 理论公式对比验证

随机介质理论认为,隧道断面开挖造成的地表沉降可以由若干个无限小开挖单元 $d\xi d\eta$ (ξ 、 η 分别为 x 、 z 方向的积分变量)造成的地表沉降积分得到^[8-9]。因顶管长度远大于其宽度,可将每个小单元的计算简化为如图 11 所示的二维平面问题。

图 11 中单元体的开挖引起的 $S_e(x)$ 为:

$$S_e(x) = \frac{1}{r(\eta)} \exp \left[-\frac{\pi}{r(\eta)^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta \quad (1)$$

式中:

$S_e(x)$ ——横坐标 x 处的地表沉降;

$r(\eta)$ ——水平面上主要影响半径。

$$r(\eta) = \frac{z_0}{\tan \beta} \quad (2)$$

式中:

z_0 ——单元体距离地表的距离;
 β ——上部岩层主要影响角。

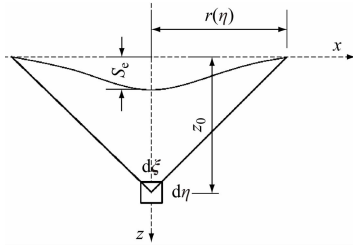


图 11 二维单元开挖示意图

Fig. 11 Schematic diagram of two-dimensional unit excavation

矩形顶管隧道不均匀收敛模式如图 12 所示。文献[10]认为不均匀收敛模式更适合应用于矩形顶管施工造成的地表沉降。

根据叠加原理,地表总沉降 $S(x)$ 由隧道开挖断面面积 $S_\Omega(x)$ 减去建成后隧道截面面积 $S_\omega(x)$, 即:

$$S(x) = S_\Omega(x) - S_\omega(x) \quad (3)$$

由式(1)一式(3),通过对阴影部分开挖单元引起的地表沉降进行积分,得到顶管施工引起的地表沉降为:

$$S(x) = \iint_{\Omega} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta - \iint_{\omega} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta \quad (4)$$

$$S(x) = \int_{z_0}^{z_0+2\Delta d_r+h} \int_{-\frac{b}{2}-\Delta d_r}^{\frac{b}{2}+\Delta d_r} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta - \int_{z_0+2\Delta d_r}^{z_0+2\Delta d_r+h} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta \quad (5)$$

根据文献[12],有:

$$\tan \beta = \frac{z_0}{\sqrt{2\pi} i} \quad (6)$$

$$i = Kz_0 \quad (7)$$

式中:

i ——地表沉降槽宽度;

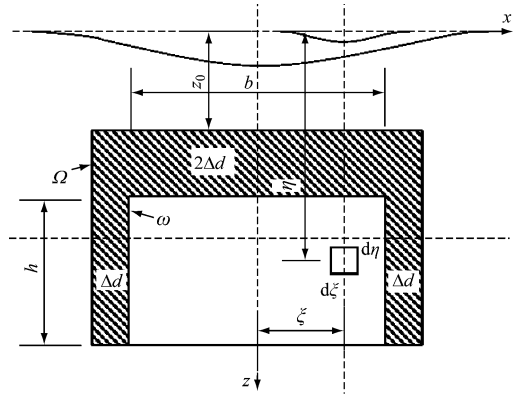
K ——地表沉降槽宽度参数,根据经验取 0.6^[7]。

经计算, $\tan \beta = 0.66$ 。

分析图 13 可知:

1) 浅埋矩形顶管上方土体轴线位置沉降大,两侧沉降小;实测沉降槽大致同 Peck 公式法及随机介质法预测的变形规律一致。

2) Peck 公式法的沉降计算曲线呈窄而深的特点;实测沉降最大值小于理论值,实测沉降槽宽度



注: Ω, ω ——隧道开挖断面及建成后隧道截面; Δd ——隧道开挖断面与建成后隧道截面之间的空隙; h, b ——分别为建成隧道截面的高、宽。

图 12 矩形顶管隧道不均匀收敛模式示意图

Fig. 12 Schematic diagram of uneven convergence mode of rectangular jacked tunnel

在实际施工中,由于同步注浆等措施的作用,随机介质模型不均匀收敛模式中的空隙并不会达到图 12 所示 Δd 的大小。因此,需引入地层损失折减系数 ρ 进行折减^[11],间隙按 $\Delta d_r = (1 - \rho) \Delta d$ ($\Delta d_r = (1 - \rho) \Delta d$) 计算。根据经验, ρ 取 40%。将积分域坐标由几何关系算得,并代入式(4),有:

大于理论沉降槽宽度。这是由于上述参数取值多参考深埋、圆形盾构隧道施工的经验值,并不能准确反映出浅埋矩形顶管施工造成的地表沉降。

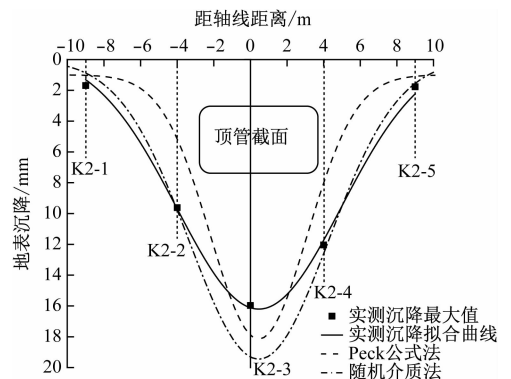


图 13 沉降的理论计算值与实测值

Fig. 13 Theoretical calculation value and measured value of surface subsidence

3) 随机介质法的最大沉降计算值大于实测值,计算的沉降槽宽度与实测值类似。这是由于根据经验取得的 ρ 偏小导致的。

上述比较结果表明,本工程的施工控制措施行之有效。

3.2 既有案例统计分析

与深埋隧道不同,浅埋矩形顶管管节正上方土体是受施工影响最大的区域。浅埋矩形顶管通常应用于软土地区,其正上方覆土层往往只有较厚的填土。填土的物理力学参数常采用经验值,并不能准确反映土层的工程性质,因此假定浅埋矩形顶管施工造成的地表沉降主要影响因素为顶管截面尺寸及埋深。本文选取类似浅埋矩形顶管施工造成的沉降槽案例进行分析,如图 14 所示。图 14 中,4 个案例的顶管埋深为 4.3~7.0 m,顶管截面宽度为 6.0~7.0 m、高度为 4.0~5.0 m。计算可得,顶管施工的横向沉降范围大致为顶管截面宽度的 3 倍,与文献[6]的结论一致。

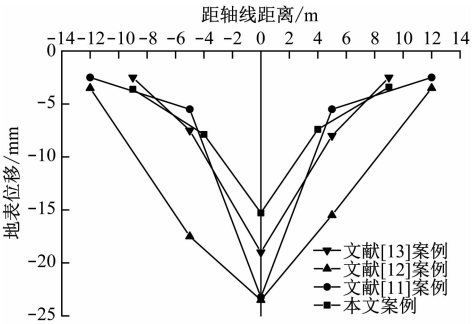


图 14 浅埋矩形顶管沉降槽案例

Fig. 14 Shallow-buried rectangular pipe jacking subsidence trough case

本文通过分析顶管管节宽、高及埋深同地表最终沉降的关系,并进行量纲一化处理,得到矩形顶管单位沉降比 λ :

$$\lambda = \frac{Sz_0}{bh} \tag{8}$$

式中:

- S ——地表沉降值;
- z_0 ——顶管隧道埋深。

计算得到 λ 值如表 2 所示。表 2 中, λ 值为 $2.36 \times 10^{-3} \sim 4.81 \times 10^{-3}$,较为集中。计算图 14 中各测点的 λ 值,结果如图 15 所示。虽然图 14 中各测点沉降差异很大,而图 15 中各测点沉降在量纲一化后得到的 λ 趋于一致。

表 2 浅埋矩形顶管参数及 λ 值					
Tab.2 Parameters and λ value of shallow-buried rectangular pipe jacking					
工程名称	b/m	h/m	z_0/m	S_{max}/mm	$\lambda/10^{-3}$
内蒙古科技大学地下过街通道 ^[5]	6.50	4.30	4.30	20.74	3.19
苏州轨道交通 5 号线石莲街站	6.90	4.20	4.42	15.97	2.44
南宁市轨道交通 1 号线一期工程南湖站	6.90	4.90	4.75	16.80	2.36
南宁地铁 1 号线金湖广场站Ⅲ号出入口 ^[6]	6.90	4.90	5.00	24.00	3.55
上海轨道交通 2 号线张江高科站 1 号出入口 ^[7]	6.00	4.00	7.00	16.50	4.81
苏州市城北路综合管廊	9.10	5.50	9.00	20.00	3.60

注: S_{max} 为地表最大沉降监测值。

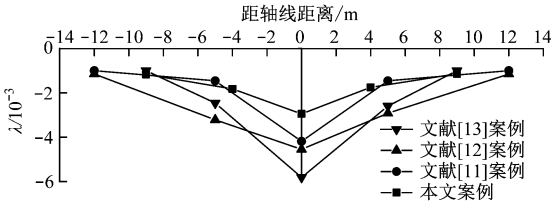


图 15 地表位移量纲一化后的 λ

Fig. 15 λ after normalization of surface subsidence

4 结语

以苏州 5 号线某车站过街通道顶管工程为例,通过分析现场实测数据,总结了浅埋矩形顶管施工过程中的地表沉降规律。将现场实测数据与以往浅埋矩形顶管工程实测数据对比分析,结果表明:

- 1) 在浅埋式矩形顶管顶进过程中,地表变形经历了微扰动、迅速沉降、注浆抬升、固结沉降四个阶段;监测断面施工阶段最大沉降值为 15.97 mm,最终沉降值为 13.72 mm;顶管施工沿顶管轴线方向引起土体沉降的范围大致为距掘进面 7.5 m 以内。
- 2) 浅埋矩形顶管施工造成的地表沉降横向范围大致为 3 倍顶管截面宽度;沉降槽大致符合 Peck 公式法以及随机介质理论法预测的变形规律;然而,Peck 公式法将由深埋盾构圆形隧道得出的经验

系数用于浅埋矩形顶管,使得沉降槽计算宽度偏小,最大沉降值偏大;随机介质理论法计算的最大沉降值同样偏大;本文进一步采用类比统计的办法,将各工程案例中的沉降值量纲一化处理,最终得到了统一的地表沉降规律。

参考文献

- [1] 银英姿,赵强,崔芳静,等.土压平衡矩形顶管施工引起的地表沉降探究[J].长江科学院院报,2019(1):95.
YIN Yingzi, ZHAO Qiang, CUI Fangjing, et al. Ground subsidence caused by earth pressure balanced rectangular pipe jacking construction[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019(1):95.
- [2] 朱剑,李振勇,张尧.复杂环境下大断面矩形顶管法施工过程中地表沉降规律及控制措施研究[J].岩土工程技术,2017(1):49.
ZHU Jian, LI Zhenyong, ZHANG Long. Study on surface subsidence law and control measures in large section rectangular pipe jacking method in complex environment[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2017(1):49.
- [3] 张涛.矩形顶管在轨道交通通道中的沉降分析[J].中国市政工程,2019(4):36.
ZHANG Tao. Settlement analysis of rectangular pipe jacking in channel of rail transit[J]. China Municipal Engineering, 2019(4):36.
- [4] 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(1):23.
HAN Xuan, LI Ning, 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(1):23.
- [5] 彭立敏,王哲,叶艺超,等.矩形顶管技术发展与研究现状[J].隧道建设,2015(1):1.
PENG Limin, WANG Zhe, YE Yichao, et al. Technological de-

velopment and research status of rectangular pipe jacking method[J]. Tunnel Construction, 2015(1):1.

- [6] 熊翦.矩形顶管关键受力分析[D].北京:中国地质大学,2013.
XIONG Jian. Analysis of critical mechanics of rectangular pipe jacking[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [7] 高毅,冯超元,程鹏.浅埋矩形顶管的“整体背土效应”研究[J].岩土工程学报,2018(10):1936.
GAO Yi, FENG Chaoyuan, CHENG Peng. Overall-carrying-soil effect of shallow buried rectangular pipe jacking[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018(10):1936.
- [8] YANG X L, WANG J M. Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2011, 26: 462.
- [9] 施成华,彭立敏,刘宝琛.浅埋隧道施工引起的纵向地层移动与变形[J].中国铁道科学,2003(4):88.
SHI Chenghua, PENG Limin, LIU Baochen. Longitudinal stratum movement and deformation caused by shallow tunnel construction[J]. China Railway Science, 2003(4):88.
- [10] 韩焯,李宁.隧道施工引起地层层位移预测模型的对比分析[J].岩石力学与工程学报,2007(3):594.
HAN Xuan, LI Ning. Comparative analysis of strata prediction models for ground movement induced by tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(3):594.
- [11] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846.
- [12] 韩焯,李宁.隧道开挖不均匀收敛引起地层层位移的预测模型[J].岩土工程学报,2007(3):347.
HAN Xuan, LI Ning. A predicting model for ground movement induced by non-uniform convergence of tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(3):347.

(收稿日期:2020-08-05)

(上接第 93 页)

- railway engineering (2009 ed.). GB 50111—2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
National Railway Administration of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture &

Building Press, 2013.

- [8] 国家铁路局.铁路桥涵混凝土结构设计规范:TB 10092—2017[S].北京:中国铁道出版社,2017.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures of railway bridges and culvert: TB 10092—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

(收稿日期:2022-03-16)