

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201900526



本刊网刊

管幕预筑法中大直径顶管施工地表沉降研究

王 梅¹, 杨松松¹, 杜建安², 郭 勇³

(1.太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2.太原市城市建设管理中心, 山西 太原 030009;
3.中铁十四局集团 第二工程有限公司, 山东 泰安 271000)

摘 要:管幕预筑法顶管工程相比于传统管幕法顶管工程具有顶管间距小、顶管直径大等特点。目前,对于密排大直径顶管的应用较少,对管幕密排顶管施工顺序和顶管施工地表沉降规律理论研究不足,密排顶管施工土体的变形趋势与单一顶管相差较大,传统的Peck公式预测地表沉降难以适用。为了解决密排顶管的施工顺序及顶管施工地表变形规律,采用大型模型试验对3种典型的顶管施工方案进行试验,研究大直径密排顶管之间的相互影响作用和顶管施工过程中的地表变形特征。结果表明:考虑管土拱效应的顶管施工方案管幕中轴线位置处的地表沉降最大值为6.09 mm,小于其他两组方案;密排顶管之间不仅存在相邻顶管相互支挡的现象,且顶管与周围土体共同作用形成的管土拱效应对施工下排顶管形成保护;管幕预筑法密排顶管群最佳的顺序为先施工管幕上排顶管,再施工管幕两侧及下排顶管。通过改进Peck公式预测密排顶管群施工产生的地表沉降,改进的公式不仅将相邻顶管与管土拱效应的支挡效应考虑在内,还修改了Peck公式参数取值的具体办法。改进Peck公式的预测结果与模型试验的横向地表沉降曲线吻合良好。

关键词:管幕预筑法;密排顶管;Peck公式;管土拱效应;地表沉降

中图分类号:U25

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2020)04-0141-08

Ground Surface Settlement Induced by Large Diameter Jacking-pipe Construction in Pipe-roof Pre-construction Method

WANG Mei¹, YANG Songsong¹, DU Jian'an², GUO Yong³

(1.School of Mining Eng., Taiyuan Univ. of Technol., Taiyuan 030024, China; 2.Taiyuan Urban Construction Management Center, Taiyuan 030009, China;
3.China Railway 14th Bureau Group Second Eng. Co., Ltd., Taian 271000, China)

Abstract: Compared with the traditional pipe curtain method, the pipe-roof pre-construction method has the characteristics of small jacking pipe spacing and large jacking pipe diameter. At present, there are few applications for close-packed large-diameter pipe jacking. The theoretical studies on the construction sequence of close-packed pipe jacking and the surface settlement law of pipe jacking construction are insufficient. The deformation trend of soil in close-packed pipe jacking construction is quite different from that of single pipe jacking. The traditional Peck formula used to predict the surface settlement is difficult to apply. In order to figure out the construction sequence and deformation law of close-packed pipe jacking construction, a large-scale model test was conducted to study the three typical pipe jacking construction schemes. The interactions between close-packed large-diameter jacking pipes and the characteristics of ground deformation during pipe jacking construction were studied. Based on the test results, in the test scheme considering the pipe soil arching effect, the maximum surface settlement at the central axis of the pipe-roof was only 6.09 mm, which was smaller than the other two sets of schemes. There was not only mutual supports between the densely packed pipes, but also the pipe soil arching effects formed by the pipe joint and the surrounding soil providing a protection for the construction of the

收稿日期:2019-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51704205);国家重点研发计划项目(2018YFC0808704)

作者简介:王 梅(1970—),女,副教授,博士。研究方向:岩土工程。E-mail: wangmei@tyut.edu.cn

网络出版时间:2020-07-11 13:44:26

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200709.2127.003.html

lower pipe. The best order of construction was first to construct the upper pipe and then to construct the pipe-roof on both sides and the lower row pipes. The ground surface settlement caused by close-packed pipe jacking construction was predicted by the improved Peck formula, which considered the supporting effect of soil arching between the adjacent pipes, and modified the specific methods of parameter selections. The prediction results of the improved Peck formula were in good agreements with the lateral surface settlement curves obtained by the model tests.

Key words: pipe-roof pre-construction method; dense pipe jacking; Peck formula; pipe soil arching effect; surface settlement

随着城市的不断发展,城市可用的“绿地”越发紧张,在城市建设中不可避免地要穿越已有建筑物,且不能影响已有建筑物的正常使用。管幕预筑法施工是在预先支护条件下进行土方开挖,可以保证施工安全,并尽可能减小对地面的扰动,同时不影响地面交通^[1-2]。管幕预筑法^[3]起源于比利时安特卫普地铁站。其施工过程中的顶管不仅有预加固隧道开挖的临时支护作用^[4],同时作为开挖隧道的永久支护结构^[5]。即在大直径顶管群施工结束后,将拟建隧道周围相邻的大直径顶管通过切割与焊接,使所有顶管形成一个联通的管幕廊道^[6],在廊道内铺设钢筋笼,然后浇筑混凝土,使管幕廊道与浇筑的混凝土形成地下通道的永久支护结构^[7]。目前,国内对于管幕预筑工法应用刚刚起步,相关研究比较少^[8]。杨仙等^[9]研究指出,管幕预筑工法顶管施工过程中引起的地表沉降最大,因此施工过程中顶管的顶进顺序至关重要。张可能等^[10]对管幕预筑法中顶管的间距进行优化,对管幕预筑法竖井支护结构及周边土体的位移与支撑轴力随施工

过程的变化规律和特征进行数值模拟。黎永索等^[11]对管幕预筑施工产生的地表沉降规律进行了相关研究。综上可知,对于顶管的研究主要集中在单根顶管方面^[12],而管幕预筑法大直径密排顶管施工过程中顶管数量多、间距小、管径大,在计算密排顶管施工过程中产生的地表沉降中不仅要考虑顶管的埋深,同时要考虑周围已建顶管对待建顶管的影响。

依托太原火车站下穿通道工程,通过大型模型试验,研究不同施工顺序下管幕预筑法顶管施工过程的地表变形规律及已建顶管对待建顶管周围土体扰动的影响,对比分析不同试验顶管方案下的地表变形特征,并与改进的Peck公式计算结果进行对比。

1 工程概况与施工步骤

太原市迎泽大街下穿太原火车站通道工程拟建场地位于太原盆地北端河谷平原,场地地形平坦,现场勘探土层分布见表1。模型试验以北通道为例,顶管埋深范围为3.51~12.01 m。

表 1 土层分布

Tab. 1 Soil distribution

土层名称	土层编号	颜色	状态	特征描述	层底埋深/m	土层厚度/m
杂填土	1-1	杂色	松散~稍密	主要由建筑垃圾、黄土及少量碎石组成,表层可见20 cm混凝土块	地表可见	1.5~15.4
素填土	1-2	黄褐色	松散~稍密	以黄土为主,局部含少量碎石	0~4.6	4.0~9.6
Q ₄ ^{al+pl} 新黄土	2-1	黄褐色	软塑	主要成分为黏粒,土质均匀,偶见白色菌丝,微含姜石	5.6~15.4	3.5~15.9
Q ₄ ^{al+pl} 新黄土	2-2	黄褐色	硬塑	主要成分为黏粒,土质均匀,偶见白色菌丝,微含姜石	12.5~26.6	未揭穿,揭露最大厚度为29.9 m

太原火车站南北通道是目前国内首次采用管幕预筑法下穿正在营运特级火车站的工程,太原火车站地下管线复杂且铁路运输繁忙,下穿施工难度较大、危险性较高,对地表沉降要求严格,采用普通的暗挖工法难以保证车站的安全,因此采用管幕预筑法修建南北通道。其中,南通道管幕段长度为105.0 m,北通道管幕段长度为102.5 m。

管幕预筑工法首先在地面施工2个工作井,作为顶管施工的始发井与接收井,工作井施工结束后开始进行管幕预筑法顶管施工。该工法主要步骤有顶管施工、永久地下结构施工和钢管帷幕内土方开挖。

1.1 顶管施工

火车站北通道现场实际施工中采用直径为2 000 mm的钢管作为管幕预筑法的顶管,顶管壁厚为20 mm,

相邻顶管之间的间距为165~265 mm,每节顶管长9 m,每节顶管通过焊接连接在一起,逐节顶进。图1为火车站下穿北通道顶管布置。

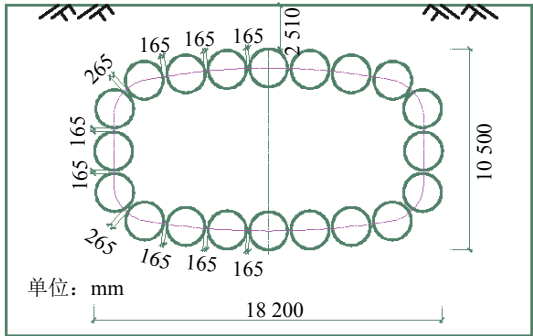


图 1 火车站北通道顶管布置

Fig. 1 Pipe jacking layout of railway station north channel

1.2 管幕联通与浇筑施工

顶管施工结束后,按照设计要求切割相邻顶管,并将相邻顶管用钢板进行焊接,切割部位每隔1.2 m设置竖向支撑柱,如图2所示。将所有顶管通过切割与焊接形成一个联通的管幕廊道,然后在联通的管幕廊道绑扎钢筋,并及时浇筑混凝土,形成一个封闭的钢管帷幕。

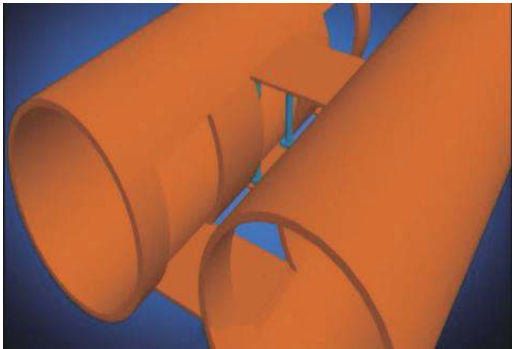


图 2 顶管切割

Fig. 2 Pipe jacking cutting

1.3 管幕内的土方开挖

当管幕廊道内混凝土浇筑完成以后,钢管帷幕永久支护结构已经形成。接着,挖出钢管帷幕永久支护结构内的土方,此时,管幕预筑法施工结束。钢管帷幕永久支护结构如图3所示。管幕内土方开挖完成以后,施作交通路面及通道照明设施即可。

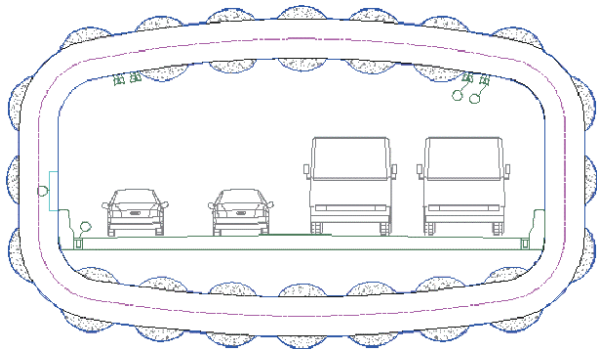


图 3 钢管帷幕支护结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of steel pipe curtain support structure

2 模型试验方案

2.1 试验尺寸

依托火车站下穿工程,采用大型模型试验对大直径密排顶管施工引起的地表变形进行研究。现场施工中顶管直径为2 000 mm,顶管埋深范围为3.51~12.01 m,试验顶管直径为170 mm。模型试验中模型管幕横截面尺寸与施工现场管幕横截面尺寸必须满足相似比的要求,顶管参数见表2,试验各物理量相似比取值见表3,试验模型尺寸见图4。

表 2 顶管参数

Tab. 2 Pipe-jacking parameters

顶管数量/根	壁厚/mm	弹性模量/MPa	顶管直径/mm	顶管长/mm
20	2.0~2.1	1.96	170	1 800

表 3 各物理量相似比

Tab. 3 Similarity ratio of each physical quantity

物理量	相似比
顶管直径	约11.76 : 1.00
顶管密度	1 : 1
土层重度	1 : 1
土体黏聚力	1 : 1
土体内摩擦角	1 : 1
土体泊松比	1 : 1
顶管弹性模量	1 : 1
顶管壁厚	约1 : 1

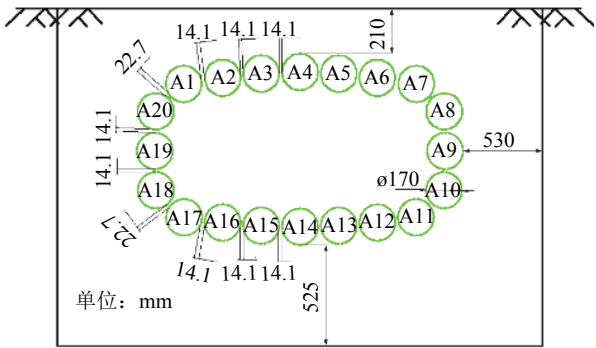


图 4 顶管模型尺寸

Fig. 4 Model size of pipe jacking

模型试验主要研究顶管顶进顺序和顶管埋深对地表变形的影响。在满足边界条件的情况下,模型中各结构的尺寸按照几何相似比约11.76:1.00进行制作。模型箱内膛尺寸为宽2 700 mm×长1 800 mm×高1 800 mm。根据模型试验相似条件,模型可利用与原型相同的材料制作,模型试验箱如图5(a)所示,由厚度为20 mm的Q235A型钢板焊接而成,并在外部设置横向和纵向的方木肋板,以保证其有足够的刚度。为使模型试验与现场实际边界条件相似,在模型箱边界涂一层薄薄的硅油脂。模型试验顶管直径为170 mm,试验顶管长度为1 800 mm。由于两种填土及两种黄土力学参数相近,为简化试验,将施工现场土层1-1与1-2归为填土,将2-1与2-2归为黄土,模型箱土层分布见表4。使用千分表监测模型试验地表沉降,千分表精度为0.001 mm,量程0~10 mm。顶管开始前记录千分表读数,用水准尺确定顶管保持水平,试验采用的挖土工具为洛阳铲。采用先挖土、后顶管的施工顺序,每次挖土深度为2.5 cm;接着,使用千斤顶将顶管顶进2.5 cm,顶管每顶进5 cm,记录一次千分表读数。千斤顶的最大顶进量程为11 cm,最大顶力为3.2 t。



(a) 模型试验箱

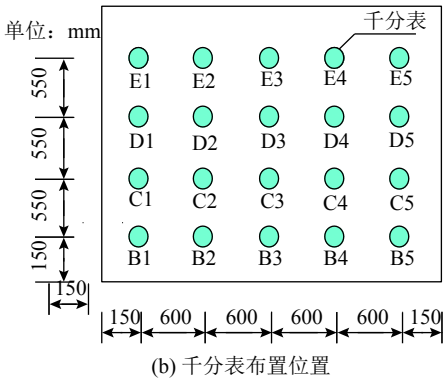


图 5 顶管模型与千分表布置

Fig. 5 Pipe jacking model and dial gauge layout
表 4 模型箱土层分布

Tab. 4 Soil distribution of model box

模型箱 土层	土层密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	厚度/ m
填土	2.00	19.6	10.00	7.9	0.86
黄土	1.86	18.2	29.39	17.3	0.94

2.2 试验顶管方案

模型试验中,顶管根数为20根。顶管可施工顺序众多,选取3种有代表性的顶管顺序作为试验方案。方案1:先施工管幕上排顶管,从管幕中轴线上排A4顶管向两侧及下排顶管施工;顶管施工顺序为A4、A2、A6、A3、A5、A1、A7、A20、A8、A19、A9、A18、A10、A17、A11、A16、A12、A15、A13、A14。方案2:上下排顶管同时施工;顶管施工顺序为A11、A1、A13、A3、A9、A20、A14、A2、A10、A6、A15、A18、A8、A16、A5、A19、A12、A7、A17、A4。方案3:先施工下排顶管,从管幕中轴线下排A14顶管向两侧及上排顶管施工;顶管施工顺序为A14、A12、A16、A13、A15、A18、A10、A17、A11、A20、A8、A19、A9、A7、A1、A5、A3、A6、A2、A4。

3 试验结果分析

3种方案地表沉降试验结果见图6。方案1中,管幕中轴线B3点地表沉降最大值为6.09 mm;方案2中,B3点地表沉降最大值为6.18 mm;方案3中,B3点的地表沉降最大值为6.39 mm。

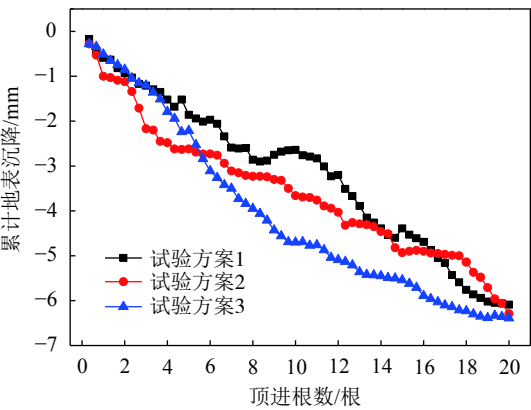


图 6 3种方案B3监测点地表沉降曲线

Fig. 6 Surface settlement curves of three schemes in B3 monitoring site

由图6可知,在顶管施工过程中,方案1的地表沉降量基本小于其他两种方案。方案1中,B3点在施工前10根顶管时,地表沉降曲线斜率相对较小,继续施工后10根顶管时,地表沉降曲线斜率相对增大。方案2中,B3点除施工前4根顶管时地表沉降曲线斜率较大之外,之后地表沉降曲线斜率趋于一致。方案3中,B3点在施工前10根顶管时,地表沉降曲线斜率较大,施工后续的10根顶管时地表沉降曲线斜率相对变小。根据第2.2节,方案1与方案3的顶管施工顺序相反,对方案1与方案3的地表沉降曲线分析可以得出,在一定埋深情况下,密排顶管施工中顶管的埋深与地表沉降有很大的关系,施工埋深较浅的顶管时引起的地表沉降较小,顶管埋深增加,顶管施工引起的地表沉降值也逐渐增加。黄宏伟等^[13]研究指出,在一定埋深范围内在隧道顶部正上方的区域,隧道开挖引起的地表沉降量随着隧道埋深的增加而增加,这与模型试验顶管施工引起的地表沉降变化趋势一致。

3.1 管土拱效应研究

图7为两种顶管方案管幕中轴线位置处地表沉降累计曲线,通过对比分析方案1与方案3的地表沉降曲线发现:方案3在施工无支挡且埋深较大的顶管时,产生的地表沉降在4.0 mm左右;方案1在施工有上排顶管支挡情况下埋深较大的顶管时,产生的地表沉降在3.50 mm左右。在相同的土层分布与施工条件下,在顶进相同位置、相同顶管数量情况下,方案1比方案3产生的地表沉降小0.5 mm左右。

方案1与方案3顶管施工顺序相反,施工类型相似,两者的区别在于顶管的起始位置不同。由图6可知,不同顶管施工顺序、施工类型引起的地表变形大不相同。方案1与方案3的顶管施工类型相似,但最终管幕中轴线地表沉降量却不相同。分析其中的原因,模型试验中相邻顶管的间距在14.1~22.7 mm,顶管间距较小。方案1中管幕上排顶管施工结束后,继续

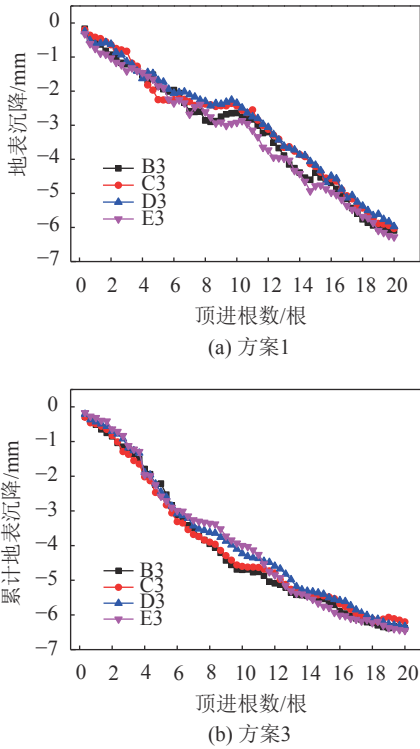


图7 两种方案管幕中轴线地表沉降

Fig. 7 Surface settlement of the central axis of Scheme 1 and 3 施工管幕下排顶管时,上排顶管开始发生作用,上排顶管与周围土体受到扰动将产生不均匀位移;由于土体与顶管位移的不一致性使上排顶管周围土体受到压缩,并使顶管与周围土体相互“楔紧”,于是就在顶管周围一定范围的土层产生“拱效应”^[14]。Hisatake等^[12]基于离心试验指出隧道面周围3维形成的拱效应可有效减小开挖隧道土体时引起的地表沉降。有一点可以确定,顶管与周围土体共同作用形成管土拱效应(图8)。在管土拱效应的保护作用下,再施工管幕下排顶管时,可以有效减小下排顶管施工时引起的地表变形。通过对比两种方案的沉降曲线可知,管土拱效应的支挡作用可有效减少管幕下排顶管施工引起的地表沉降量,从而可以减小管幕预筑法顶管施工引起的总的地表沉降。因此,在管幕预筑法封闭管幕顶管施工中,应考虑管土拱效应的支挡作用。

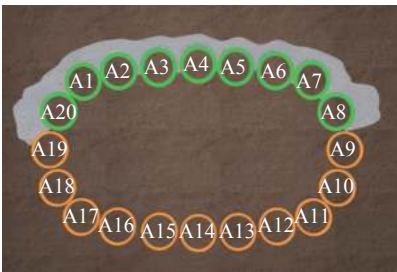


图8 管土拱效应示意图

Fig. 8 Schematic diagram of pipe jacking soil arching effect

3.2 密排顶管施工地表沉降计算与参数取值

3.2.1 密排顶管地表沉降计算

先施工的顶管由于周围土体未受到扰动,顶管周围没有遮挡,其施工产生的地表沉降与Peck公式的预测值接近;在后续顶管施工过程中,由于已建顶管对周围土体产生扰动,导致待建顶管周围土体强度降低,故后续顶管施工过程中所引起地表沉降最大值与沉降槽的宽度都会变大。杨仙^[15]在对密排顶管群施工地表沉降的研究中指出,密排顶管施工中引起地表沉降计算仍然可以采用Peck公式进行计算:

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

$$S_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{i\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

$$V_{\text{loss}} = \eta\pi R^2 \quad (3)$$

式中: $S(x)$ 为地表沉降量; x 为离顶管中轴线的水平距离, m; $S_{\max}$ 为顶管中轴线上方的最大地表沉降量, m; i 为顶管中轴线到地面沉降曲线反弯点的水平距离, 即地面沉降槽宽度系数; V_{loss} 为顶管单位长度的土体体积损失量, m^3/m , 可采用挖掘顶管面积的百分率估算; η 为土体损失百分率, 根据魏纲^[16]研究表明, 在开挖隧道过程中, 土体的地表损失率计算方法通常有3种: 理论计算法、反算法和经验法。其中: 经验法取值简单方便, 精度较低; 理论计算法计算复杂, 对于涉及的注浆折减系数的选取也是依靠经验; 反算法是通过具体的地表沉降数据代入式(2)进行计算, 精度最高, 但必须有地表沉降数据^[16]。本文模型试验可以得到具体的地表沉降数据, 故采用反算法可以准确计算出地表损失率, 通过第1层的最大地表沉降量代入Peck公式即可得到 η 的值, 即 $\eta = \frac{S_{\max} i \sqrt{2\pi}}{\pi R^2}$; 通过沉降损失率公式可计算出本次顶管施工的土体损失率为2.3%。

随着顶管施工数量增多, 先建顶管对于后建顶管的影响除了土体扰动外, 还有一个重要的影响因素, 即先建顶管对于土层变形影响线内部土体进行支挡, 阻止其向开挖区域移动^[15]。密排顶管施工中, 已建顶管对于待建顶管有支挡作用, 支挡原理如图9~10所示。

因此, 在使用Peck公式计算地表沉降时, 需考虑临近顶管的支挡与上部已建顶管与土体形成的管土拱效应对于下部顶管的支挡作用, 考虑支挡作用后的Peck修正公式见式(4)、(5)、(9)、(10)。试验顶管分层按照顶管埋深进行划分, 第1层为A4顶管, 第11层为A14顶管。

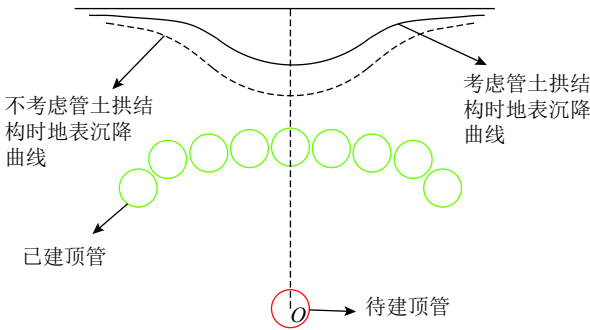


图 9 相邻顶管支挡示意图

Fig. 9 Schematic diagram of adjacent pipe jacking support

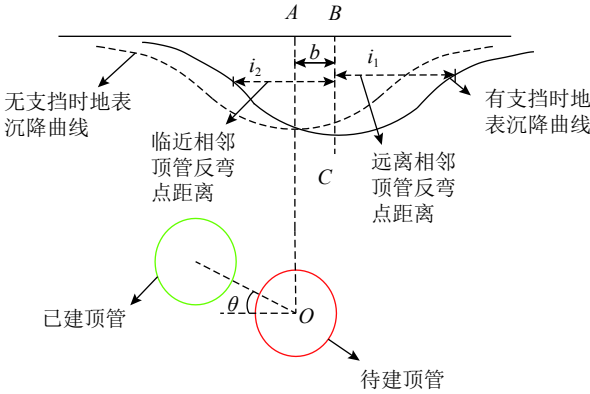


图 10 管土拱效应支挡示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the support of the pipe soil arching effect

相邻支挡影响(2~5层顶管):

$$S(x) = S_{1\max} e^{-\frac{(x-b)^2}{2i_1^2}}, x \geq b \quad (4)$$

$$S(x) = S_{2\max} e^{-\frac{(x-b)^2}{2i_2^2}} - c, x < b \quad (5)$$

远离相邻顶管一侧最大地表沉降值:

$$S_{1\max} = \frac{V'_{\text{loss}}}{i_1 \sqrt{2\pi}} \approx \frac{V'_{\text{loss}}}{2.48i_1} \quad (6)$$

靠近相邻顶管一侧最大地表沉降值:

$$S_{1\max} = \frac{V'_{\text{loss}}}{i_2 \sqrt{2\pi}} \approx \frac{V'_{\text{loss}}}{2.48i_2} \quad (7)$$

$$V'_{\text{loss}} = \delta V_{\text{loss}} + V_{\text{loss}} \quad (8)$$

考虑相邻支挡与上部管土拱效应支挡共同影响(6~11层顶管):

$$S(x) = \lambda S_{1\max} e^{-\frac{(x-b)^2}{2i_1^2}}, x \geq b \quad (9)$$

$$S(x) = \lambda(S_{2\max} e^{-\frac{(x-b)^2}{2i_2^2}} - c), x < b \quad (10)$$

式中: V'_{loss} 为考虑临近顶管施工重复扰动对隧道开挖土体损失的影响; δ 为额外土体损失率, 魏纲^[16]研究表明, 重复扰动情况下会增加密排顶管施工土体损失量, 在黏性土层中扰动导致的额外土体损失率 δ 为 0.3%; i_1 为远离相邻顶管一侧反弯点到顶管中心轴线的距离, i_2 为靠近相邻顶管一侧反弯点到顶管中心轴

线的距离, 根据 Fujita^[17] 的研究, i_1 受现有顶管的影响较小, 因此 i_1 的值可以是顶管埋深 h 的 1/2, 即 $i_1 = 0.5h$, i_2 受现有顶管的影响较大, 左表面沉降槽的宽度明显变窄, 研究表明 $i_2 = i_1 - 0.5D$ (D 为顶管直径) 可用于地表沉降预测; c 为常数, 可根据管幕横向沉降曲线的连续性计算(左右曲线在最大沉降点处相等); λ 为管幕上排管土拱效应对下排顶管保护作用的地表沉降折减系数, 本文取值为 0.65。

3.2.2 沉降计算公式参数取值研究

不同相邻顶管中轴线夹角引起地表沉降最大偏移距离不同, 如果两个相邻顶管中轴线夹角为 θ , b 为地表沉降最大值的偏移距离, b 与顶管直径 D 、相邻顶管中轴线水平夹角和土层条件有关, 采用 FLAC^{3D} 模拟相邻顶管不同中轴线夹角的偏移距离 b 。研究表明, 最大地表沉降偏移距离 b 在黄土与填土土层中变化规律一致, 通过对模拟结果的总结, 具体的参数 b 取值见表 5。

表 5 FLAC^{3D} 模拟相邻顶管引起最大地表沉降偏移距离
Tab. 5 Maximum surface settlement offset distance caused by adjacent pipe jacks simulated by FLAC^{3D}

$\theta/(^\circ)$	[0, 15)	[15, 30)	[30, 45)	[45, 60)	[60, 90)
b	0	0.5D	0.75D	D	1.25D

为研究不同土质条件下管土拱效应引起地表沉降折减系数 λ 的大小, 采用 FLAC^{3D}, 在方案 1 施工顺序下对本文工程中涉及的黄土与填土, 以及工程中常见的粉质黏土和黏质砂土的顶管施工进行模拟研究, 从而计算出不同土层中管土拱效应对地表沉降折减系数。模型尺寸与模型试验保持一致, 即 2 700 mm×1 800 mm×1 800 mm, 模型如图 11 所示。

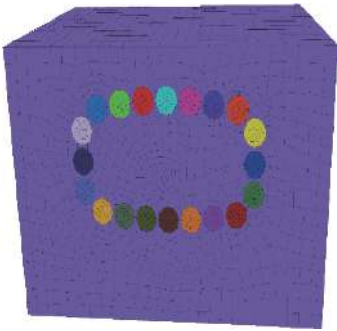


图 11 FLAC^{3D} 模型

Fig. 11 FLAC^{3D} model

图 12 为距离顶管施工始发位置 150 mm 处 4 种土层地表沉降曲线。由图 12 可知, 不同土质条件下, 相同顶管方案施工引起地表变形不相同。对于黏聚力较大的黄土, 地表沉降相对较小; 对于黏聚力较小的黏质粉土, 地表沉降相对较大。采用改进的 Peck 公式确定不同土质条件下管土拱效应引起地表沉降折减系数 λ 的取值, 结果见表 6。

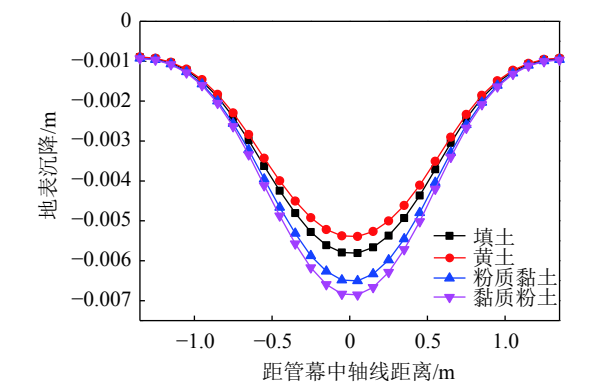


图 12 FLAC^{3D}模拟不同土层的地表沉降曲线

Fig. 12 Surface settlement curves of different soil layers simulated by FLAC^{3D}

表 6 地表沉降折减系数 λ 取值

Tab. 6 Ground settlement reduction factor λ

土层条件	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	λ
填土	10.00	7.9	0.65
黄土	29.39	17.3	0.60
粉质黏土	9.21	7.6	0.70
黏质沙土	6.63	13.6	0.75

根据预测公式计算施工每层顶管在D排监测点处的地表沉降值,对方案1中施工每层顶管产生的地表沉降量进行叠加。图13为改进的Peck公式预测施工每层顶管总的地表沉降曲线。由图13可知,地表沉降曲线基本关于管幕中轴线对称,当施工顶管根数逐渐增多后,沉降槽的宽度也逐渐增大,最大地表沉降值也随之增大。在方案1顶管施工顺序下,管幕中轴线最大地表沉降值增长速率变缓,图14为方案1模型试验管幕横向D排监测点地表沉降曲线。

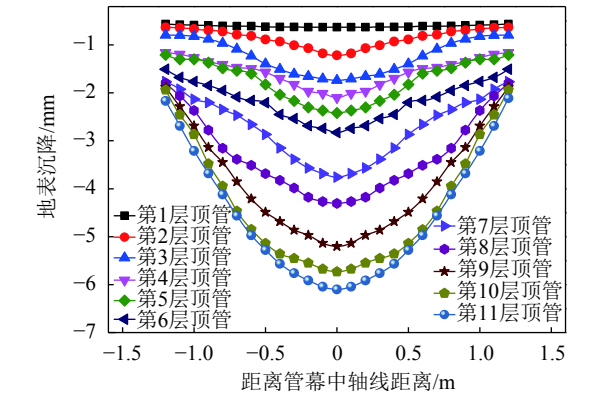


图 13 地表沉降预测曲线

Fig. 13 Predicted curves of surface settlement

改进的Peck公式不仅考虑相邻顶管之间的支挡作用,还考虑管幕上排顶管与周围土体形成的管土拱效应对于下排顶管的“保护”作用。由图15试验与预测结果对比可知:考虑相邻顶管支挡与管土拱效应支挡影响下的地表沉降预测曲线与模型试验地表

沉降曲线变化基本一致;随着顶管顶进数量的增大,改进的Peck公式预测值与试验实测值吻合良好。

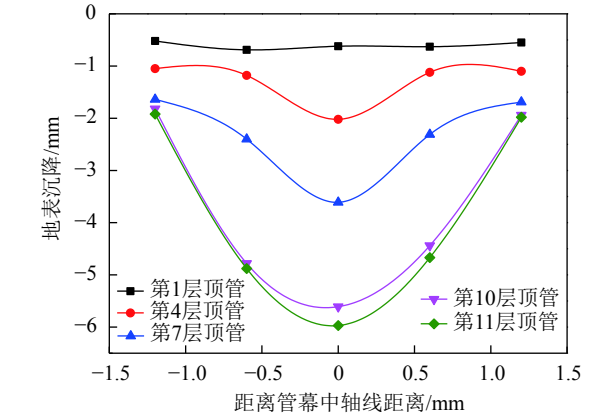


图 14 试验地表沉降曲线

Fig. 14 Test ground settlement curves

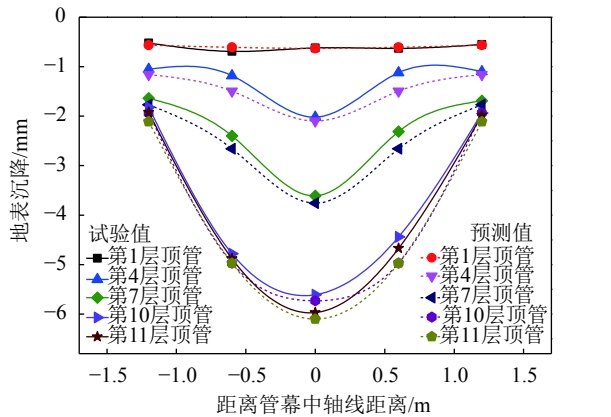


图 15 试验与预测结果对比

Fig. 15 Comparison of test and prediction results

4 结 论

通过模型试验研究密排大直径顶管施工过程中对地表产生的影响,找到一种合理的顶管施工方案,可有效减小地表沉降,为后续工程提供借鉴。主要结论如下:

1) 密排顶管群施工过程中已建顶管与周围土体共同作用形成管土拱效应,对下排顶管形成“保护”,再施工下排顶管时可有效减少下排顶管施工时引起的地表沉降。

2) 通过研究确定管幕预筑法封闭管幕顶管群施工的最佳顺序,即先施工管幕上排顶管,再施工下排顶管。

3) 通过模型试验可确定在密排顶管施工中存在管土拱效应和相邻顶管的支挡作用,管土拱效应的支挡作用与土质条件、顶管间距、土体含水率有一定的关系。对于相邻顶管施工引起最大地表沉降偏移距离 b 和密排顶管施工过程中的管土拱效应对地表沉降的折减系数 λ 参数选取,可作为后续密排顶管群

施工的研究方向。

4) 为了能更好地使相似模型试验应用于实际工程,通过大尺寸模型试验探究密排封闭管幕合理的顶管施工顺序,以及在该方案下的地表变形规律,模型试验管幕横向地表沉降量与改进的Peck公式吻合良好,试验结果可应用于实际工程。

参考文献:

- [1] Park I J,Kwak C W,Kim S W,et al.Verification and general behaviour of Tubular Roof & Trench method (TR&T) by numerical analysis in Korea[J].[Tunnelling and Underground Space Technology](#),2006,21(3/4):394.
- [2] Zhang Peng,Ma Baosong,Zeng Cong,et al.Key techniques for the largest curved pipe jacking roof to date:A case study of Gongbei tunnel[J].[Tunnelling and Underground Space Technology](#),2016,59:134–145.
- [3] Xing Kai,Chen Tao,Huang Changbo.On new tubular roof method[J].[Urban Rail Transit Research](#),2009,12(8):63–67. [邢凯,陈涛,黄常波.新管幕工法概述[J].[城市轨道交通研究](#),2009,12(8):63–67.]
- [4] Kang Yongshui,Liu Quansheng,Cheng Yong,et al.Combined freeze-sealing and New Tubular Roof construction methods for seaside urban tunnel in soft ground[J].[Tunnelling and Underground Space Technology](#),2016,58:1–10.
- [5] Yang Xian,Li Yongsuo.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.
- [6] Li Yongsuo,Zhang Keneng,Huang Changbo,et al.Analysis of the ground deformation to large cross-section tunnel by Pipe-roof Pre-construction Method[C]//2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering,July 15–17,2011.[Inner Mongolia:IEEE](#),2011.
- [7] Xiao J Z,Dai F C,Wei Y Q,et al.Analysis of mechanical behavior in a pipe roof during excavation of a shallow bias tunnel in loose deposits[J].[Environmental Earth Sciences](#), 2016,75(4):293.
- [8] Yang Xian,Zhang Keneng,Li Zhong.Influence of steel pipe jacking on land subsidence in pipe curtain prefabrication method[J].[Journal of Shenyang University of Technology](#), 2012,34(4):469–473.[杨仙,张可能,李钟.管幕预筑法中钢管顶进对地面沉降的影响[J].[沈阳工业大学学报](#),2012,34(4):469–473.]
- [9] Yang Xian,Zhang Keneng,Li Zhong,et al.Optimal design of distance between jacking pipes of new pre-construction method in metro station[J].[China Railway Science](#),2011, 32(2):61–66.[杨仙,张可能,李钟,等.地铁车站新预筑法施工中顶管间距的优化设计[J].[中国铁道科学](#),2011,32(2):61–66.]
- [10] Zhang Keneng,Peng Huanyun,Xu Qingwei,et al.Numerical simulation on construction process of working well and pipe jacking by pipe-roof pre-construction method[J].[Chinese Journal of Nonferrous Metals](#),2012,22(3):985–990.[张可能,彭环云,许庆伟,等.管幕预筑法竖井开挖与顶管施工过程数值模拟分析[J].[中国有色金属学报](#),2012,22(3):985–990.]
- [11] Li Yongsuo,Zhang Keneng,Huang Changbo,et al.Analysis of surface subsidence of tunnel built by pipe-roof pre-construction method[J].[Rock and Soil Mechanics](#),2011,32(12): 3701–3707.[黎永素,张可能,黄常波,等.管幕预筑隧道地表沉降分析[J].[岩土力学](#),2011,32(12):3701–3707.]
- [12] Hisatake M,Ohno S.Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face[J].[Tunnelling and Underground Space Technology](#), 2008,23(2):120–127.
- [13] Huang Hongwei,Hu Xin.3D numerical analysis on construction mechanic effect of pipe-jacking[J].[Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#),2003,22(3):400–406.[黄宏伟,胡昕.顶管施工力学效应的数值模拟分析[J].[岩石力学与工程学报](#),2003,22(3):400–406.]
- [14] Zhang Jianhua,Xie Qiang,Zhang Zhaoxiu.Arching effect of anti-slide pile structure and its numerical simulation[J].[Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#),2004, 23(4):699–703.[张建华,谢强,张照秀.抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟[J].[岩石力学与工程学报](#),2004,23(4):699–703.]
- [15] Yang Xian.Research of large diameter jacking-pipes with small space in pipe-roof pre-construction method[D]. Changsha:Central South University,2012.[杨仙.管幕预筑法中密排大直径钢管群顶进研究[D].[长沙:中南大学](#), 2012.]
- [16] Wei Gang.Selection and distribution of ground loss ratio induced by shield tunnel construction[J].[Chinese Journal of Geotechnical Engineering](#),2010,32(9):1354–1361.[魏纲.盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J].[岩土工程学报](#),2010,32(9):1354–1361.]
- [17] Fujita K.On the surface settlements caused by various methods of shield tunneling[C]//Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.San Francisco,609–610.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Wang Mei,Yang Songsong,Du Jian'an,et al.Ground surface settlement induced by large diameter jacking-pipe construction in pipe-roof pre-construction method[J].[Advanced Engineering Sciences](#),2020,52(4):141–148.[王梅,杨松松,杜建安,等.管幕预筑法中大直径顶管施工地表沉降研究[J].[工程科学与技术](#),2020,52(4):141–148.]