

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.249



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 粉细砂地层双线盾构施工实测地表沉降规律 分析与预测

廖赵胜<sup>1</sup>, 相龙胜<sup>2</sup>, 高顺宇<sup>2</sup>, 丁建文<sup>1</sup>, 刘慧刚<sup>1</sup>

(1. 东南大学交通学院, 南京 211189; 2. 中交隧道工程局有限公司南京分公司, 南京 210000)

**摘要:** 依托南通地铁二号线某区间盾构隧道施工, 针对盾构穿越典型粉细砂地层条件, 对双线盾构隧道施工引起的地表沉降开展现场测试和规律分析, 对经典Peck公式在南通地区粉细砂地层中双线盾构施工的适用性进行探讨, 并研究先行线和后行线土体损失率和地表沉降槽宽度系数的取值及影响因素。研究表明, 在粉细砂地层中, 后行线隧道施工对地层的二次扰动效应会引起先行线轴线上方地表沉降的显著增加, 且二次扰动效应明显强于其他软土地层, 但弱于砂土地层; 相较于淤泥质土地层, 在粉细砂地层中盾构停机对地表沉降的影响更为显著; 先行线和后行线施工引起土体损失率比值 $\eta_1/\eta_2$ 在1~5倍范围内, 平均值为2.3, 先行线和后行线地表沉降槽宽度系数比值 $K_1/K_2$ 在1~2倍范围内, 平均值为1.4; 砂土、粉细砂和粉土地层中土体损失率比值 $\eta_1/\eta_2$ 均大于1,  $\eta_1/\eta_2$ 和 $K_1/K_2$ 与隧道覆土深度比( $H/D$ )相关性较弱。

**关键词:** 粉细砂地层; 双线盾构; 地表沉降; 土体损失率; 沉降槽宽度系数

**中图分类号:** U455.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)02-0079-10

## Investigation of surface settlement induced by twin shield tunnelling in silty fine sand stratum

LIAO Zhaosheng<sup>1</sup>, XIANG Longsheng<sup>2</sup>, GAO Shunyu<sup>2</sup>, DING Jianwen<sup>1</sup>, LIU Huigang<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China; 2. CCCC Tunnel Engineering Company Limited, Nanjing 210000, P. R. China)

**Abstract:** Field tests were carried out to observe surface settlement induced by twin shield construction in silty fine sand stratum, based on the project of Nantong Metro line 2. The applicability of the twin peck formula for silty fine sand stratum is examined through measured data. The ground loss rate, the width of the preceding tunnel and the rear tunnel were analyzed. The results show that in silty fine sand soil, the secondary perturbation effect of tunnel construction on the rear tunnel induces a significant increase in surface settlement above the axis of the preceding tunnel. The secondary perturbation effect in silty fine sand stratum is more

**收稿日期:** 2021-07-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(51978159); 中交隧道工程局有限公司项目(X-GD-SNJGS(S)-JIS-NT02-09-QT-21)

**作者简介:** 廖赵胜(1997-), 男, 主要从事盾构施工对周围环境影响研究, E-mail: 220193199@seu.edu.cn。

丁建文(通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: jwding@seu.edu.cn。

**Received:** 2021-07-08

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51978159); CCCC Tunnel Engineering Company Limited (No. X-GD-SNJGS(S)-JIS-NT02-09-QT-21)

**Author brief:** LIAO Zhaosheng (1997-), main research interest: influence of tunnel excavation on surrounding environment, E-mail: 220193199@seu.edu.cn.

DING Jianwen (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: jwding@seu.edu.cn.

obvious than that in other soft soil layers, but less than that for sand layer. Compared with silty soil layer, the impact of shield stoppage on ground settlement is more significant in silty fine sand stratum. The ratio of ground loss rate  $\eta_1/\eta_2$  caused by the twin shield construction ranges from 1 to 5 with a mean value of 2.3, and the ratio of the surface settlement trough width parameter  $K_1/K_2$  between the leading tunnel and the trailing tunnel ranges from 1 to 2 with a mean value of 1.4; The ratios of ground loss rate  $\eta_1/\eta_2$  in sand, silty fine sand, and silt soil strata all exceed 1. Furthermore, none obvious relationship can be found between ratios of ground loss rate  $\eta_1/\eta_2$ , width parameter  $K_1/K_2$  and the ratio of cover depth to diameter ( $H/D$ ).

**Keywords:** silty fine sand stratum; twin shield; surface settlement; ground loss rate; settlement trough width parameter

随着地下轨道交通建设的飞速发展,盾构法施工因其安全、高效、对周围环境影响较小等优点得到了广泛应用。盾构施工对周围地层产生扰动和造成土体损失,引起土体应力状态的改变,导致地层发生变形<sup>[1]</sup>。双线盾构隧道由于变形叠加和受二次扰动的影响,引起的地层变形规律更为复杂<sup>[2]</sup>。此外,地铁隧道由于其功能要求,多建于建筑物、高架桥梁、管道管线等非常密集的城市中心区域,尤其在复杂地质条件下,盾构穿越敏感结构物时,若控制不当,盾构施工引起的地层变形会对构筑物产生严重影响<sup>[3]</sup>。因此,研究盾构隧道施工过程中引起的地表沉降规律不仅有重要的理论价值,亦可为实际工程提供经验和指导。

学者们针对盾构隧道施工过程中引起的地表沉降变形规律进行了大量研究,主要基于现场实测数据分析与经验公式对比<sup>[4]</sup>、理论分析法<sup>[5]</sup>、模型试验法<sup>[6]</sup>和数值模拟法<sup>[7]</sup>。Peck<sup>[4]</sup>基于大量实测数据,建立了半理论半经验的地表横向沉降预测公式,其假定地表横向沉降槽呈正态分布;Sagaseta<sup>[5]</sup>假设土体为各向同性不可压缩体,基于镜像法原理提出了盾构施工土体损失引起的土体三维变形解析解;Attewell等<sup>[8]</sup>、刘建航等<sup>[9]</sup>基于概率累积曲线提出了盾构隧道轴线上方纵向地表沉降预测方法。Peck公式因其简单实用,在实际工程中得到广泛应用,该法关键在于确定土体损失率和沉降槽宽度系数。在单线盾构隧道引起地表沉降变形规律基础上,双线隧道主要考虑地表沉降叠加和后行线施工二次扰动影响。New等<sup>[10]</sup>假定无二次扰动效应,采用单线隧道Peck公式叠加计算双线隧道施工引起的地表沉降;然而,大量实测数据表明,双线隧道施工二次扰动效应会对地表沉降产生显著影响<sup>[11-13]</sup>;Suwansawat等<sup>[14]</sup>和马可栓<sup>[15]</sup>应用超几何法分别对先行线和后行线采用不同的土体损失率和沉降槽宽度系数考虑先行隧道对后行隧道的影响,建立了双线盾构隧道开挖地表沉降预测公式,该方法需分

别确定先行线和后行线的土体损失率和沉降槽宽度系数的取值;白海卫等<sup>[16]</sup>和丁智等<sup>[17]</sup>等通过现场实测数据分析了双线隧道施工二次扰动效应,并研究了不同地层条件下先行线和后行线土体损失率和沉降槽宽度系数的取值范围。现有研究成果揭示了盾构掘进过程地表沉降变形规律,然而对于不同地层条件、施工环境和施工参数引起的隧道地表变形规律差异较大,因此,针对南通地区粉细砂地层双线盾构隧道施工引起地表沉降变形特征和规律值得进一步研究。

笔者依托南通地铁2号线某双线盾构区间施工展开现场测试研究,针对该地区典型的粉细砂地层特征,探讨双线盾构隧道施工过程中地表变形规律,并采用Peck公式对地表沉降进行拟合分析,研究粉细砂地层土体损失率和沉降槽宽度系数的取值范围,并分析先行线和后行线土体损失率和沉降槽宽度系数的相关关系及影响因素。

## 1 工程概况及现场监测点位布置

南通市轨道交通2号线太平路北站—南通东站全长约1.879 km,全线采用地下敷设方式,区间纵断面成“V”形坡,左线长1 392.85 m,右线长1 394.98 m,区间隧道顶覆土厚度为9.34~17.88 m,左线隧道先开挖,左线开挖完成后右线施工,隧道左右线中心轴线间距为13~17 m,采用土压平衡盾构法施工,区间圆形隧道衬砌结构采用外径6.2 m、内径5.5 m,环宽1.2 m,厚度0.35 m管片错缝拼装。

区间沿线场地位于长江三角洲冲—海积新三角洲平原,该区域地面高程为2.5~4.5 m,地势低平,盾构始发及到达处理深8.64~9.89 m,从上到下主要土层为①杂填土、②-1黏质粉土、③-1粉砂夹砂质粉土、③-2粉砂、④-1粉质黏土、④-2粉质黏土夹砂质粉土,隧道剖面图如图1所示。

通过地表布置沉降监测点监测双线盾构隧道

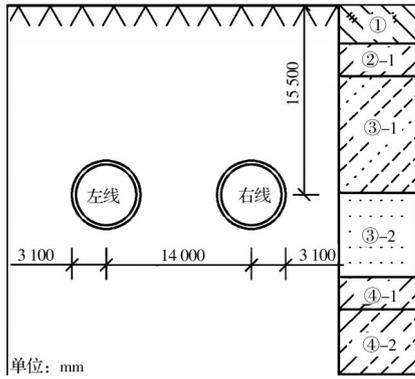


图 1 隧道剖面图

Fig. 1 Profile of double-line tunnel

施工过程中产生的地表沉降,盾构在进出洞 50 环以内时,每隔 4 环管片宽度布置一个横向沉降监测断面,其余位置每隔 10 环布置监测断面,每个监测断面布设 11 个监测点,在两条隧道轴线内每隔 3 m 左右布置一个监测点,而在轴线外侧监测点间距依次为 3、5、10 m,在开挖面距监测断面 50 环以内时开始进行监测,直至盾构通过监测断面土体变形逐渐稳定,部分监测点布置如图 2 所示。

## 2 地表沉降实测结果分析

### 2.1 地表横向变形规律分析

随盾构掘进过程典型断面不同施工阶段地表横向沉降曲线如图 3 所示,图中同时给出了右线后行线施工引起的地表沉降净增量,可以看出,当左线开挖面穿过监测断面时,地表沉降最大值位于左线轴线上方,地表沉降曲线大致呈现“V”形,双线隧道轴线中心点上方沉降较小,且小于右线隧道轴线上地表沉降,分析认为由于该隧道沿城市道路开挖,双线隧道轴线中心点位于道路中间,基本不受车辆荷载影响,而右线隧道轴线上方则受到左线开挖土体损失扰动和车辆荷载的共同作用。左线隧

道开挖贯通后,XD63 号和 XD128 号断面变形基本稳定,从开挖面穿过监测断面至变形稳定,地表沉降增加较大,XD63 号断面左线轴线上地表沉降增加量占其最终沉降量的 31%,而 XD128 号断面左线轴线上地表沉降增加量占比为 48%。当右线隧道开挖面穿过监测断面时,左线隧道轴线上地表发生显著沉降,表明双线隧道施工具有显著的沉降叠加效应和二次扰动效应。随着右线隧道的贯通,由隧道施工引起的土体变形逐渐稳定。相比于左线先行线,右线隧道施工引起的地表沉降净增量在隧道两侧呈现出明显的不对称,其隧道轴线左侧地表沉降净增量远大于另外一侧,地表沉降曲线最终为“W”形。进一步研究发现,典型断面左线贯通变形稳定时左线隧道轴线上地表沉降量和右线贯通变形稳定时右线隧道轴线上地表沉降量大致相同,且左线轴线上地表最终沉降量大于右线轴线上方的地表最终沉降量,这主要是右线开挖对左线隧道周围土体的二次扰动,造成土体应力重分布,导致左线衬砌结构发生变形和位移,引起地层损失增大,导致地表沉降增加<sup>[18]</sup>,XD63 号断面左线轴线上方由于二次扰动增加的沉降量占最终沉降量的 37.5%,XD128 号断面占 26%。

由此可见,在粉细砂地层中后行隧道开挖对先行隧道周围土体二次扰动引起的地层变形不可忽视,定义二次扰动效应  $N$  (左线隧道轴线上最大沉降量和右线隧道轴线上最大沉降量比值)描述二次扰动效应,选取 XD63 号和 XD128 号断面,并收集不同地层盾构施工相关数据,如表 1 所示。可以看出,南通粉细砂地层中由后行隧道施工引起的二次扰动效应强于淤泥和淤泥质土地层,但弱于砂土地层,这可能是由于砂土和粉细砂土黏聚力较低结构松散,更易受施工扰动影响。因此,盾构在粉细

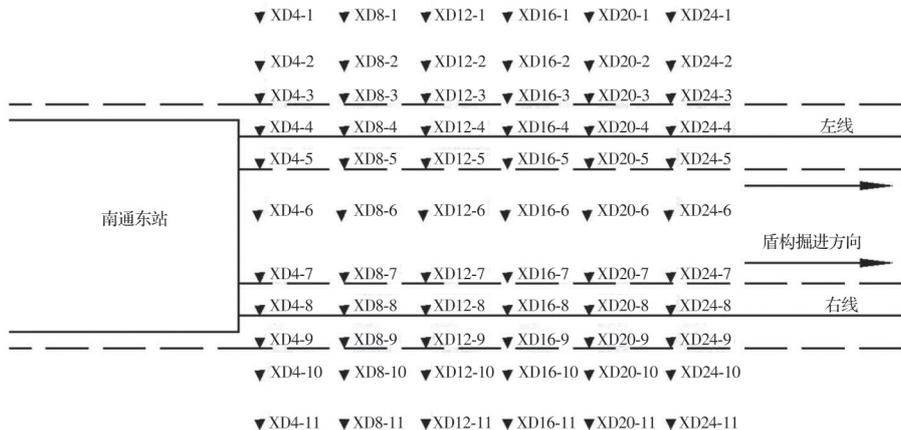


图 2 地表沉降监测点布置图

Fig. 2 Instrumentation of settlement measuring points

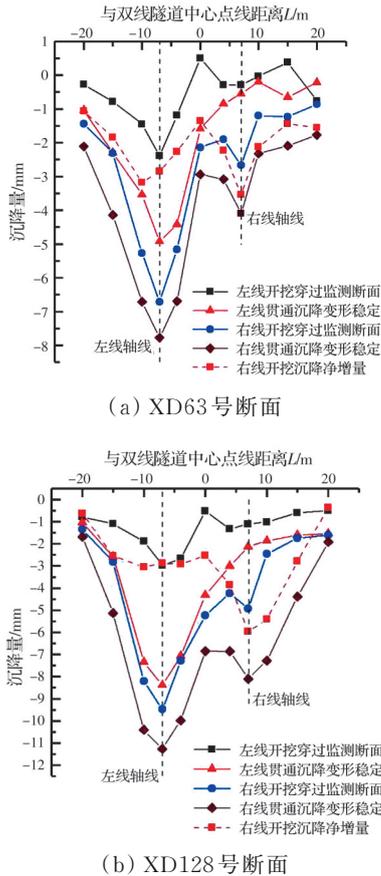


图3 横向地表沉降曲线

Fig. 3 Lateral ground surface settlement curves of sections XD63 and XD128

砂地层施工过程中,应加强施工参数控制和地表变形监测,以减少后行线开挖二次扰动效应对土体变形的影响,保障工程安全。

表1 不同地层二次扰动效应 $N$ 值Table 1 Value of  $N$  in different strata

地区	盾构穿越地层	$N$	参考文献
南通	粉砂、粉细砂、砂质粉土	1.66	本文
Preth	砂土、粉砂	1.81	Mathew等 <sup>[12]</sup>
杭州	淤泥、粉土	1.27	Chen等 <sup>[19]</sup>
杭州	淤泥质粉质黏土	1.59	丁智等 <sup>[17]</sup>

图4为其余部分断面地表沉降曲线,可以看出,不同断面地表沉降曲线形状和最大值均存在一定差异,这主要和断面地层条件变化和施工参数差异有关。对太平路北站—南通东站之间区间监测断面变形曲线符合Peck经验公式预测的断面沉降最大值进行统计,统计结果如图5所示,可以看出,不同断面最大地表沉降量主要介于2~8 mm之间,最大达到16 mm左右,最大地表沉降值分布形态大致符合正态分布,偏态系数 $SK=0.92$ ,为右偏分布;峰态系数 $K=-0.35$ ,为扁平分布。总体来看地表

沉降变形量不大,表明采用土压平衡盾构在粉细砂地层中掘进时,能较好地控制地层变形。

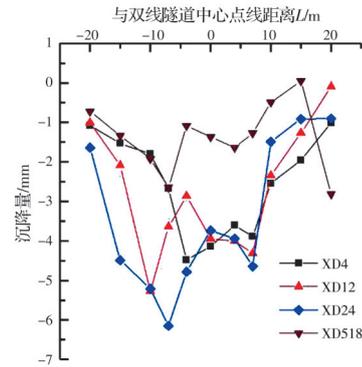


图4 部分断面地表沉降曲线

Fig. 4 Surface settlement measured curves of sections

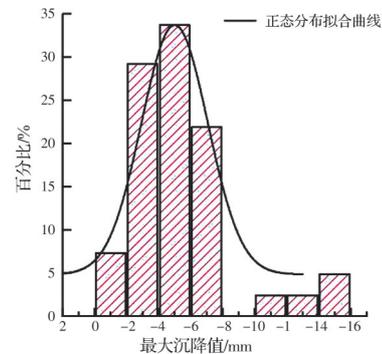


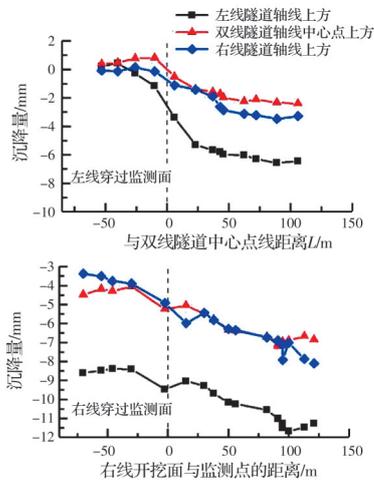
图5 不同监测断面地表沉降最大值统计

Fig. 5 Statistics of maximum settlement in different sections

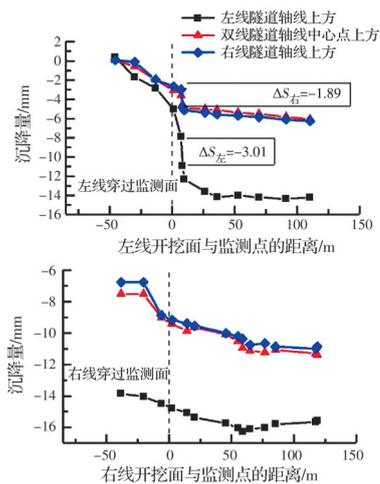
## 2.2 地表沉降随开挖面距离变形规律分析

如图6所示为XD128号和XD158号断面轴线上方地表沉降监测点变形曲线,图中距离为负值表示开挖面未到达监测断面。可以看出,在左线隧道开挖面距监测断面30 m左右时,地表开始发生变形,开挖面穿过监测断面时沉降迅速发展,当开挖面穿过监测断面40 m左右时沉降趋于稳定。通过对比发现,左线盾构开挖纵向影响范围为70 m左右,而右线盾构纵向影响范围则更大,在整个施工过程中,左线隧道轴线上方地表沉降量始终大于双线隧道轴线中心点和右线隧道轴线上方地表沉降量。XD158号断面在左线开挖面穿过监测断面后地表沉降呈现突变式增加,增长幅度远大于XD128号断面,分析认为是由于左线盾构开挖至165环时,因盾构机检修停机5 d所致,如图7所示。此时开挖面穿过XD158号断面仅8.4 m,盾构停机会对周围环境产生长期而显著的影响,从而引起土体变形持续增大<sup>[20]</sup>,Row等<sup>[21]</sup>分析了盾构停机引起土体发生显著变形的原因,指出在盾构停机状态下,土压舱内土体排水固结,导致土压舱所提供的掌子面压力下降,从而引起掌子面土体向隧道内移动,导致地

层损失加大;此外,盾构停机时在自身重力作用下,隧道下方土体被压缩,引起隧道下沉,同样也会导致地层损失增大,引起地表变形增加。



(a) XD128号断面



(b) XD158号断面

图 6 纵向地表沉降曲线

Fig. 6 Longitudinal ground surface settlement curves of sections XD128 and XD158

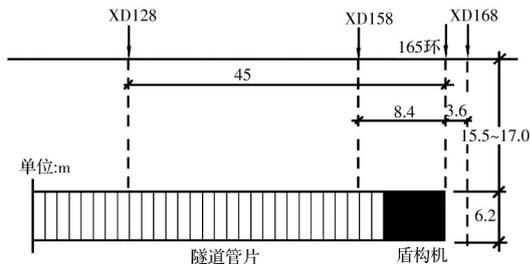


图 7 盾构停机位置示意图

Fig. 7 The position of TBM stoppage

为进一步分析盾构停机引起的地表沉降变形规律,图 8 给出了停机时盾构前方 XD168 号断面轴线上方地表变形曲线,该监测断面距盾构停机面仅 3.6 m,图中  $\Delta S_{左}$  和  $\Delta S_{右}$  分别为左线和右线轴线上

方盾构停机期间地表沉降增量,由图可知,XD158 号和 XD168 号断面地表沉降量远大于 XD128 号断面,主要原因是盾构停机时开挖面已穿过 XD128 号断面 45 m,盾构停机对其影响可以忽略,而停机时盾构前方 XD168 号断面地表沉降量远大于后方 XD158 号断面,这和 Yao 等<sup>[22]</sup>的实测数据相反,其实测的宁波地铁 3 号线停机期间盾构前方地表沉降量远小于盾构后方,这可能与停机期间土舱压力有关,宁波地铁 3 号线盾构停机期间向土压舱注入膨润土泥浆并采用千斤顶推力维持土舱压力,掌子面压力基本稳定,其地表变形主要由盾构下方土体固结沉降引起,因而停机导致的盾构后方沉降较大,而盾构前方土体沉降较大可能主要由掌子面土体向隧道内移动引起;XD168 号断面左线隧道轴线上方盾构停机引起的沉降占左线隧道施工总沉降量的 53%,右线隧道轴线上方盾构停机引起的沉降占左线隧道施工总沉降量的 53.5%,而 XD158 号断面左右线隧道轴线上方沉降增量所占比例分别为 20% 和 25%。

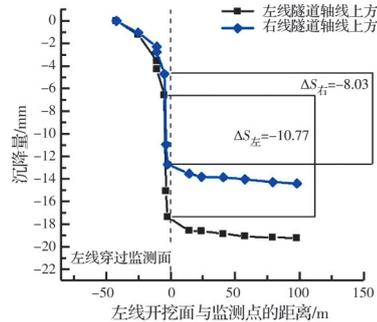


图 8 XD168号断面纵向地表沉降曲线

Fig. 8 Ground surface settlement curve of section XD168

进一步以开挖隧道轴线上方盾构停机期间前方土体沉降增量所占施工总沉降量的比例  $\Delta S/S$  来评价盾构停机对土体变形的影响,并收集文献中的相关数据,如表 2 所示。由表 2 可见,粉细砂地层盾构停机对周围土体变形影响明显大于淤泥质土地层,可能是由于粉细砂渗透性较大,土舱内渣土更易排水固结,因此盾构在粉细砂、砂土等渗透性较强的地层中施工时应尽量避免停机或减少停机次数,以减少盾构隧道开挖对周围环境的影响。

表 2 不同地层盾构停机影响对比

Table 2 Contrast of  $\Delta S/S$  in different strata

地区	盾构穿越地层	( $\Delta S/S$ )/%	参考文献
南通地铁隧道	粉砂、粉细砂、砂质粉土	53	本文
杭州庆春路隧道	淤泥质粉质黏土、粉质黏土	36	林存刚等 <sup>[23]</sup>
上海公路隧道	淤泥质黏土、砂质粉土	39	侯永茂等 <sup>[24]</sup>

### 3 横向地表沉降 Peck 经验公式预测分析

Peck<sup>[4]</sup>基于大量实测数据,假定单线隧道上方地表变形符合正态分布,不考虑土体排水固结引起的沉降,提出单线隧道横向地表沉降计算公式,见式(1)、式(2)。

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

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

式中: $x$ 为与隧道轴线距离; $S(x)$ 为 $x$ 处的地表沉降值; $S_{\max}$ 为最大地表沉降值,发生在隧道轴线上方; $i$ 为地表沉降槽宽度; $\eta$ 为地层土体损失率; $R$ 为隧道开挖半径。

马可栓<sup>[15]</sup>考虑双线隧道开挖的相互影响,提出双线 Peck 公式计算隧道地表沉降。

$$S(x) = \frac{\pi R^2 \eta_1}{i_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-L/2)^2}{2i_1^2}\right] + \frac{\pi R^2 \eta_2}{i_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-L/2)^2}{2i_2^2}\right] \quad (3)$$

式中: $x$ 为与双线隧道轴线对称点距离; $L$ 为双线隧道轴线间距离; $i_1$ 为先行隧道地表沉降槽宽度; $\eta_1$ 为先行隧道土体损失率; $i_2$ 为后行隧道地表沉降槽宽度; $\eta_2$ 为后行隧道土体损失率。O'Reilly 等<sup>[25]</sup>指出地表沉降槽宽度 $i$ 与隧道埋深 $H$ 成正比,比例系数 $K$ 为地表沉降槽宽度系数,其值取决于隧道上方地层性质。

采用线性回归分析法,通过实测数据拟合式(3)中的相关参数,并依据式(3)对 XD24 号和 XD128 号断面的地表横向沉降变形进行预测,计算结果如图 9 所示。由图 9 可知, XD24 号断面实测沉降和预测沉降曲线大致相同,均呈现出“W”形,而 XD128 号断面双线隧道对称轴线上方地表沉降预测值偏大,但沉降实测最大值与预测值基本一致,说明采用双线 Peck 公式预测粉细砂地层中双线盾构隧道掘进引起的地表沉降基本可行。利用式(3)预测地表沉降的关键是确定先行线和后行线地表沉降槽宽度系数 $K$ 和土体损失率 $\eta$ 。

利用式(3)对地表变形曲线符合双线 Peck 公式预测的有效断面实测数据进行拟合,计算土体损失率和地表沉降槽宽度系数,分析南通粉细砂地层中土体损失率和地表沉降槽宽度系数的取值范围,并研究先行线和后行线土体损失率和地表沉降槽宽度系数之间的关系。左线隧道和右线隧道开挖土体损失率分布如图 10 所示,由图 10 可知,该隧道工

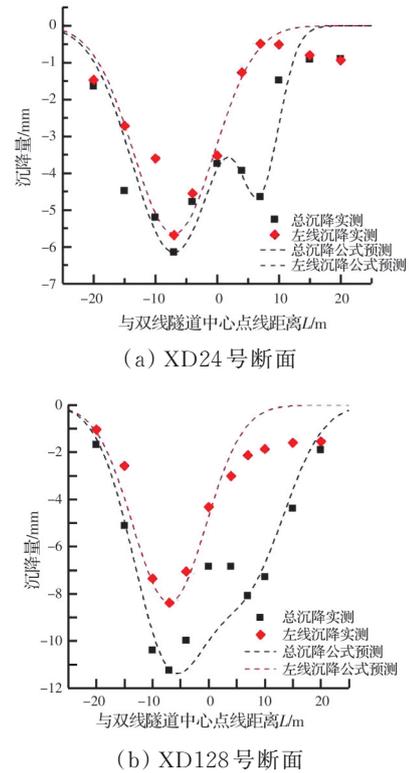


图 9 地表横向沉降变形拟合曲线

Fig. 9 Interpretation of measurements by Peck empirical curves at monitoring sections of XD24 and XD128

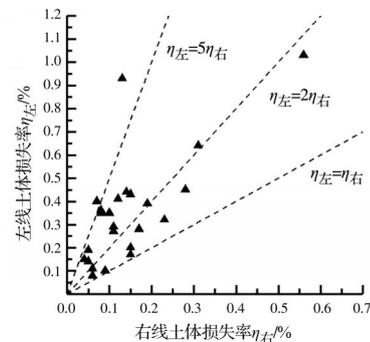


图 10 土体损失率分布图

Fig. 10 The distribution of ground loss rate

程各有效监测断面土体损失率 $\eta$ 主要分布区间为 $0.05\% \sim 0.5\%$ ,平均值为 $0.25\%$ ,左线土体损失率 $\eta_{\text{左}}$ 为 $0.1\% \sim 0.45\%$ ,右线土体损失率 $\eta_{\text{右}}$ 为 $0.05\% \sim 0.25\%$ ,平均值分别为 $0.35\%$ 和 $0.15\%$ ,这和 Loganathan 等<sup>[26]</sup>和 Mathew 等<sup>[12]</sup>统计的砂土、粉细砂土层中土压平衡盾构地层损失率基本一致;左线先行线和右线后行线土体损失率相差较大, $\eta_{\text{左}}$ 和 $\eta_{\text{右}}$ 比值在 $1 \sim 5$ 倍范围内,左线先行线土体损失率平均值为右线的 $2.3$ 倍左右,这和右线隧道施工二次扰动效应有关<sup>[16]</sup>。

左线隧道和右线隧道地表沉降槽宽度系数 $K$ 分布如图 11 所示,由图 11 可知,该隧道工程各有效

监测断面  $K$  值主要分布区间为 0.2~0.7, 平均值为 0.49, 左线先行线  $K$  为 0.3~0.7, 右线后行线  $K$  为 0.2~0.6, 平均值分别为 0.57 和 0.40, 研究结果与韩焯等<sup>[27]</sup>统计的北京地区砂土和黏土互层地层  $K$  值为 0.3~0.6, O'Reilly 等<sup>[25]</sup>统计的地下水以下的砂土、粉细砂土地层  $K$  值为 0.4~0.5, 与研究成果大致相符; 左线先行线和右线后行线地表沉降槽宽度系数比值在 1~2 之间, 平均值为 1.41 左右。因此, 在工程中采用双线 Peck 公式预测南通粉细砂地层地表沉降变形时, 建议先行线土体损失率取为后行线的 2.5 倍, 先行线地表沉降槽宽度系数取为后行线的 1.5 倍。

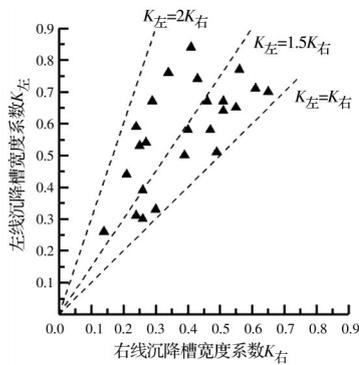


图 11 地表沉降槽宽度系数分布图

Fig. 11 The distribution of width parameter

#### 4 双线隧道地表沉降特征影响因素讨论

双线盾构隧道先行线和后行线土体损失率比值  $\eta_1/\eta_2$  和地表沉降槽宽度系数比值  $K_1/K_2$  综合反映了先行线和后行线施工参数不同和二次扰动效应引起的地表沉降差异, 为进一步分析先行线和后行线土体损失率和地表沉降槽宽度系数的取值, 收集已有文献中的相关数据, 如表 3 所示, 表中  $D$  为隧道直径。由表 3 可知, 土体损失率比  $\eta_1/\eta_2$  最小值为 0.40, 小于 1, 位于杭州淤泥质粉质黏土层中, 表明在该地层中后行线土体损失率大于先行线, 武汉粉质黏土层和长沙风化泥质粉砂岩和板岩地层中的  $\eta_1/\eta_2$  均出现小于 1 情况, 而杭州、Preth 和本文的砂土、粉细砂和粉土地层中  $\eta_1/\eta_2$  均大于 1, 其原因可能为盾构在砂土、粉细砂地层中掘进时易发生拱效应, 使得隧道开挖引起土体应力释放范围较小, 沉降槽宽度较窄<sup>[29]</sup>, 因而先行线盾构施工过程中对后行线上方土体扰动较小, 而后行线施工时先行线上方土体已发生沉降变形, 在后行线隧道施工扰动下沉降变形继续发展, 造成先行线土体损失率大于后行线。地表沉降槽宽度系数比值  $K_1/K_2$  最小值为 0.54, 位于粉质黏土地层中。

表 3 不同地层土体损失率比值和沉降槽宽度系数比值对比

Table 3 Comparison of  $\eta_1/\eta_2$  and  $K_1/K_2$  in different strata

地区	盾构穿越地层	样本数	$H/D$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_1/\eta_2$	$K_1$	$K_2$	$K_1/K_2$	参考文献
南通	粉砂、粉细砂、 砂质粉土	25	2.13~	0.10%~	0.05%~	1.0~5.0	0.3~0.7	0.2~0.6	1.0~2.0	本文
			3.61	0.45%	0.25%					
Preth	砂土、粉砂	3	2.10	0.14%~ 0.25%	0.06%~ 0.19%	1.32~2.33				Mathew 等 <sup>[12]</sup>
杭州	粉土、 粉质砂土	1	3.17	1.03%	0.65%	1.58				Rowe 等 <sup>[21]</sup>
Bangkok	软黏土、砂土	7	2.88~				0.47~	0.35~	0.90~	Suwansawat 等 <sup>[14]</sup>
			4.04				0.70	0.70	1.67	
武汉	粉质黏土、粉 细砂	8	1.11~	0.40%~	0.23%~	0.52~2.93	0.31~	0.37~	0.54~	马克栓 <sup>[15]</sup>
			4.09	4.78%	1.64%		0.96	1.77	1.27	
杭州	淤泥质粉质 黏土	8	1.25~	0.19%~	0.17%~	0.40~3.30				丁智等 <sup>[17]</sup>
			1.56	0.66%	1.15%					
长沙	中风化泥质粉 砂岩和板岩	8	2.06~	0.64%~	0.59%~	0.81~1.30	0.34~	0.28~	0.89~	蒋彪等 <sup>[28]</sup>
			4.04	1.39%	1.17%		0.52	0.59	1.13	

图 12 和图 13 给出了土体损失率比值  $\eta_1/\eta_2$  和沉降槽宽度系数比值  $K_1/K_2$  同隧道覆土深度比 ( $H/D$ ) 的相关性, 覆土深度比指隧道上覆土厚度和直径的比值。可以看出,  $\eta_1/\eta_2$  和  $K_1/K_2$  离散性较大, 难以用函数关系拟合, 但对于深埋隧道 ( $H/D \geq 2.0$ ) 随着覆土深度比的增加,  $\eta_1/\eta_2$  和  $K_1/K_2$  有逐渐增长的趋势,

而对于浅埋隧道 ( $H/D < 2.0$ ) 随着覆土深度比的增加,  $\eta_1/\eta_2$  和  $K_1/K_2$  有减小的趋势, 表明覆土深度比虽然对土体损失率和地表沉降槽宽度系数有一定影响, 但其单因素影响较弱, 土体损失率和地表沉降槽宽度系数比值更多是受施工因素和地层条件的影响。

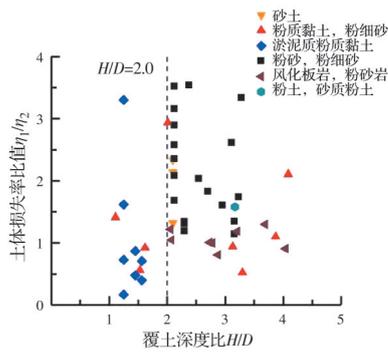


图12 覆土深度比与先后行线地层损失率比值关系

Fig. 12 Relationship between ratio of cover depth to diameter and  $\eta_1/\eta_2$

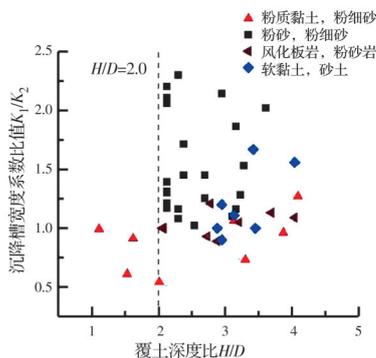


图13 覆土深度比与先后行线沉降槽宽度系数比值关系

Fig. 13 Relationship between ratio of cover depth to diameter and  $K_1/K_2$

## 5 结论

1)南通地区粉细砂地层中盾构右线后行线隧道施工对地层的二次扰动效应会引起左线先行线轴线上方地表沉降显著增加,对比杭州和Preth地区不同地层中的隧道施工效应,分析可得粉细砂和砂土地层隧道施工引起的二次扰动效应强于淤泥和淤泥质土地层。

2)盾构停机会引起停机开挖面附近地表沉降显著增加,通过分别对比杭州和上海地区淤泥质土和粉质黏土地层中盾构停机引起地表沉降量和施工总沉降量比值 $\Delta S/S$ ,可得粉细砂地层盾构停机对周围土体变形影响显著大于淤泥质土和粉质黏土地层,故建议在粉细砂地层施工时应尽量避免停机或减少停机次数。

3)该区间各有效监测断面土体损失率 $\eta$ 主要分布区间为0.05%~0.5%,平均值为0.25%,左线先行线土体损失率平均值为右线的2.3倍左右;各有效监测断面 $K$ 值主要分布区间为0.2~0.7,平均值为0.49,左线和右线地表沉降槽宽度系数比值平均值为1.41左右。因此,在工程中采用双线Peck公式预测南通地区粉细砂地层地表沉降变形时,建议先行线土体损失率取为后行线的2.5倍,先行线地

表沉降槽宽度系数取为后行线的1.5倍。

4)砂土、粉细砂和粉土地层中先行线和后行线土体损失率比值 $\eta_1/\eta_2$ 均大于1,另外,土体损失率比值 $\eta_1/\eta_2$ 和沉降槽宽度系数比值 $K_1/K_2$ 与隧道覆土深度比( $H/D$ )相关性较弱。

## 参考文献

- [1] 王智德, 江俐敏, 饶宇. 基于时空关系的盾构开挖地表沉降规律[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 62-69.  
WANG Z D, JIANG L M, RAO Y. Estimation of ground settlement induced by shield tunnel excavation based on the time-space relationship [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 62-69. (in Chinese)
- [2] 尚艳亮. 无水砂层地铁盾构隧道施工环境影响机理及监测预警研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.  
SHANG Y L. Study on the influence mechanism of environment and monitoring early-warning of the shield tunnel construction in the anhydrous sand layer [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [3] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.  
QIU W G. The study on mechanics principle and countermeasure of approaching excavation in underground works [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- [4] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]//Proceeding 7th ICSMFE. Mexico City State of the Art Report, 1969, 225-290.
- [5] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. Géotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [6] 王海涛, 金慧, 涂兵雄, 等. 砂土地层地铁盾构隧道施工对地层沉降影响的模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(6): 70-78.  
WANG H T, JIN H, TU B X, et al. Model test study on influence of ground settlement caused by shield tunnel construction in sand stratum [J]. China Railway Science, 2017, 38(6): 70-78. (in Chinese)
- [7] 李琳, 崔惟超, 董光辉, 等. 盾构施工引起周围土体位移的数值研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 755-763.  
LI L, CUI W C, DONG G H, et al. Numerical study on ground displacement induced by shield tunneling [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(5): 755-763. (in Chinese)
- [8] ATTEWELL P B, WOODMAN J P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused

- by tunnelling in soil. *Ground Eng*, 1982, 15 (8), 13 - 22, 36.
- [9] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.  
LIU J H, HOU X Y. *Shield tunnel* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991. (in Chinese)
- [10] NEW B M, O' REILLY M P. Tunnelling induced ground movements; predicting their magnitude and effects [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Ground Movements and Structures, 1991: 671-697.
- [11] FARGNOLI V, BOLDINI D, AMOROSI A. Twin tunnel excavation in coarse grained soils: Observations and numerical back-predictions under free field conditions and in presence of a surface structure [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 49: 454-469.
- [12] MATHEW G V, LEHANE B M. Numerical back-analyses of greenfield settlement during tunnel boring [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(2): 145-152.
- [13] SIRIVACHIRAPORN A, PHIENWEJ N. Ground movements in EPB shield tunneling of Bangkok subway project and impacts on adjacent buildings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 30: 10-24.
- [14] SUWANSAWAT S, EINSTEIN H H. Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(4): 445-468.
- [15] 马可栓. 盾构施工引起地基移动与邻近建筑保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.  
MA K S. Research on the ground settlement caused by the shield construction and the protection of the adjacent buildings [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [16] 白海卫, 宋守信, 王剑晨. Peck公式在双线盾构隧道施工地层变形中的适应性分析[J]. *北京交通大学学报*, 2015, 39(3): 30-34.  
BAI H W, SONG S X, WANG J C. An adaptability study of Peck formula applied to predicting ground settlements induced by double shield tunneling [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2015, 39(3): 30-34. (in Chinese)
- [17] 丁智, 王凡勇, 魏新江. 软土双线盾构施工地表变形实测分析与预测[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(1): 61-68.  
DING Z, WANG F Y, WEI X J. Prediction and analysis of surface deformation caused by twin shield construction in soft soil [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(1): 61-68. (in Chinese)
- [18] 卢健, 姚爱军, 郑轩, 等. 地铁双线隧道开挖地表沉降规律及计算方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(Sup2): 3735-3747.  
LU J, YAO A J, ZHENG X, et al. Study on the law and computational method of ground surface settlement induced by double-line tunnel excavation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38 (Sup2): 3735-3747. (in Chinese)
- [19] CHEN R P, ZHU J, LIU W, et al. Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(1): 163-171.
- [20] 何彦承, 童磊, 刘兴旺, 等. 考虑停机影响的软土盾构隧道施工变形性状分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2020, 46(Sup1): 48-55.  
HE Y C, TONG L, LIU X W, et al. Analysis of deformation behavior of shield tunnel in soft soil under construction considering the effect of shutdown of the shield [J]. *Sichuan Building Science*, 2020, 46(Sup1): 48-55. (in Chinese)
- [21] ROWE R K, LEE K M. Subsidence owing to tunnelling. II. Evaluation of a prediction technique: Reply [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(3): 467-469.
- [22] YAO Y M, LU N, YANG Y M, et al. Study of long-termed displacements of a tunnel boring machine during its stoppage [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 84: 432-439.
- [23] 林存刚, 吴世明, 张忠苗, 等. 盾构掘进速度及非正常停机对地面沉降的影响[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2472-2482.  
LIN C G, WU S M, ZHANG Z M, et al. Influences of shield advance rate and abnormal machine halt on tunnelling-induced ground surface settlements [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2472-2482. (in Chinese)
- [24] 侯永茂, 郑宜枫, 杨国祥, 等. 超大直径土压平衡盾构施工对环境影响的现场监测研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(1): 235-242.  
HOU Y M, ZHENG Y F, YANG G X, et al. Measurement and analysis of ground settlement due to EPB shield construction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 235-242. (in Chinese)
- [25] O' REILLY, M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kindom their magnitudes and prediction[C]//Jones M J. *Proceedings of Tunnelling' 82 Symposium*, 1982: 173-181.
- [26] LOGANATHAN N, POULOS H G, BUSTOS-

- RAMIREZ A. Estimation of ground loss during tunnel excavation [C]//Conference Proceedings in International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng 2000, Melbourne.
- [27] 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, 28(1): 23-28, 35.
- HAN X, LI N, 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, 28(1): 23-28, 35. (in Chinese)
- [28] 蒋彪, 皮圣, 阳军生, 等. 长沙地铁典型地层盾构施工地表沉降分析与预测[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 181-187.
- JIANG B, PI S, YANG J S, et al. Analysis and prediction of ground surface settlements due to EPB shield tunneling of Changsha metro [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 181-187. (in Chinese)
- [29] MAIR R J, TAYLOR R N. Theme lecture: Bored tunneling in the urban environment[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, 1997: 2353-2385.

(编辑 王秀玲)