

# 深厚软流塑地层预加固对盾构隧道掘进变形的影响

杨平<sup>1</sup>, 陈杰<sup>1</sup>, 张志宇<sup>2</sup>, 吴永哲<sup>2</sup>, 王岩梓<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 中交隧道局集团有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘要** 目的 以佛山地铁3号线工程为依托,研究深厚软流塑地层预加固对盾构隧道掘进变形的影响。方法 采用格栅式三轴搅拌桩进行预加固处理,利用Plaxis 3D数值软件通过实测验证的数值模拟方法,模拟分析不同加固范围及隧道埋深在双线盾构隧道掘进时对地表竖向位移的影响。结果 采用格栅式三轴搅拌桩加固处理时,当控制加固深度及宽度分别为隧道拱顶上部 $0.5D$ 到拱底部 $0.5D$ 和隧道左右两侧各 $0.5\sim1D$ 之间,加固效果显著,最大沉降值由未加固时 $27.7\text{ mm}$ 减少到 $8.9\text{ mm}$ ,为未加固的 $32.1\%$ ;先行隧道大于后行隧道对地表沉降的影响,地表沉降槽最大值偏向先行隧道一侧;当隧道埋深达到 $3D$ ,即可有效减少隧道掘进对地表沉降的影响。结论 合理控制三轴搅拌桩预加固范围、掘进参数和合理的隧道埋深能有效减少隧道掘进对地表沉降的影响。

**关键词** 盾构隧道,三轴搅拌桩加固,加固范围,变形控制,数值模拟

中图分类号 U455.43

文献标志码 A

## Influence of Pre-reinforcement in Deep Soft Fluid Plastic Stratum on Deformation of Shield Tunneling

YANG Ping<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>, ZHANG Zhiyu<sup>2</sup>, WU Yongzhe<sup>2</sup>, WANG Yanzi<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, China, 210037; 2. China Communications Construction Co. Ltd., Nanjing, China, 210024)

**Abstract:** Based on the project of Foshan Metro Line 3, the influence of pre reinforcement of deep soft fluid plastic stratum on the tunneling deformation of shield tunnel was studied. The grid type triaxial mixing pile as pre reinforcement, the numerical simulation method verified through actual measurement by the Plaxis 3D numerical software as research method, the influence of different reinforcement scope and tunnel buried depth on the vertical displacement of ground surface during double track shield tunneling is simulated and analyzed. The results show that when the grid

收稿日期:2022-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51978339);中交隧道局科研项目(GUD-FSGTJT-3202-2-JS-08)

作者简介:杨平(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事环境岩土与地下工程方面研究。

triaxial mixing pile is used for reinforcement, When the control reinforcement depth and width are respectively  $0.5 D$  from the upper part of the tunnel arch crown to  $0.5 D$  from the lower part of the arch bottom and  $0.5 \sim 1 D$  from the left and right sides of the tunnel, The reinforcement effect is remarkable. The maximum settlement value is reduced from 27.7 mm to 8.9 mm, which is 32.1% of that without reinforcement. The influence of the first tunnel is greater than that of the second tunnel on the surface settlement, and the maximum value of the surface settlement trough is biased to one side of the first tunnel; When the buried depth of the tunnel reaches  $3 D$ , the impact of tunnel excavation on surface settlement can be effectively reduced. So it can be effectively reduced the impact of tunnel excavation on surface settlement by reasonably controlling the pre reinforcement range of triaxial mixing pile, tunneling parameters and reasonable tunnel buried depth.

**Key words:** shield tunnel, triaxial mixing pile reinforcement, reinforcement range, deformation control, numerical simulation

近年来,随着地下轨道交通迅速发展,在市区建筑物密集区,难以避免出现地铁隧道穿越建筑物、地下管线和桩基的情况<sup>[1-4]</sup>,因此在地铁建设中如何控制深厚软土地层盾构隧道掘进变形,确保施工前后安全已成为亟须解决的关键性问题。

目前,针对软土地层盾构隧道掘进变形控制问题,国内外专家学者开展了大量研究。在掘进过程中通过控制盾构机姿态,优化盾构施工过程中的掘进速度、千斤顶推力、土仓压力、刀盘扭矩、同步注浆等参数来控制变形<sup>[5-8]</sup>。H. Peng 等<sup>[9]</sup>研究了盾构穿越对既有地铁隧道变形的影响,提出了在盾构穿越地铁工程中需确定最佳盾构参数,以减小对周围土体和既有结构的影响。在盾构掘进前采用地面三轴搅拌桩、高压旋喷桩<sup>[10]</sup>、超前注浆孔注浆<sup>[11]</sup>及冻结法<sup>[12]</sup>等加固方法对深厚软土地层进行预加固处理。杨龙等<sup>[13]</sup>用数值模拟与现场监测相结合的方法,对不同软土地层分布下施工沉降规律以及深厚软土区注浆加固范围进行了研究。唐志辉<sup>[14]</sup>、孟庆坤<sup>[15]</sup>研究了地铁隧道穿越时的土体加固范围对既有构筑物 and 地表沉降的影响。上述文献主要是地层加固方案或未加固地层盾构掘进参数方面的研究。笔者以佛山地铁3号线创驹区间实际工程为背景,分析了深厚软土地层盾构掘进前不同加固方案的地层适应性及特点,选取适用于佛山地区深

厚软土地层的加固方式,并对盾构掘进过程中的掘进参数控制,然后对不同加固体范围和隧道埋深进行数值模拟分析,提出了深厚软土地层盾构隧道掘进三轴预加固变形控制技术,以期类似地层盾构隧道施工提供经验及借鉴。

## 1 工程概况

佛山轨道交通3号线创意园站—驹荣北路站区间段全长约1430 m,双线隧道间距为14 m,区间隧道外径6 m,拱顶覆土埋深约为9.06~21.32 m。创驹区间隧顶地层为第四系人工填土层,隧道主要穿越第四系海陆交互沉积层中的淤泥质土、淤泥质粉细砂和淤泥质中粗砂。

根据本区间地层及水文条件,选用德国海瑞克复合式土压平衡盾构机,盾口直径6.45 m、盾尾直径6.43 m、长8.60 m,刀盘采用4辐条+4面板的设计形式,开口率为36%,以土压平衡掘进模式掘进。

## 2 盾构掘进变形控制技术研究

### 2.1 加固方式比选

本区间隧道下穿越淤泥和淤泥质粉细砂层,地质条件较差,地层抗力系数较小,管片容易变形,且软流塑地层具有较高的灵敏度和触变性。如盾构直接开挖,极易失稳加大地表沉降,使地面构筑物发生沉降破坏,因此

施工前需对该地层进行加固处理,以保证地铁隧道的施工安全和运营安全。目前,软流塑地层盾构隧道掘进常用的地层加固方法有地面旋喷、地面三轴搅拌桩、盾构超前孔注浆和管片壁后深孔注浆等,表1为各软土地层

加固方法对比分析。综合各方法的技术可行性、地层适应性、经济效益以及对周边环境的影响等因素,结合本工程的软流塑深厚软土地层工期等特点,选择地面三轴搅拌桩法对地基进行预加固处理。

表1 软流塑地层加固方法综合对比

加固方法	地层适用性	优缺点、工法特点及环境影响	工期	经济效益
地面旋喷桩法	适用于淤泥、淤泥质土、砂土、粉土、黏土等地层	施工占地少、振动小、噪音较低、泥浆污染较大,水泥土后期强度高,盾构推进难	成桩较快	成本较高
地面三轴搅拌桩法	适用于淤泥与淤泥质土、粉土、黏性土以及无流动地下水的饱和松散砂土地基等	对土体扰动较小,环境污染小,无泥浆污染,水泥土后期强度较高	成桩较快	成本低
盾构超前孔注浆法	适用于上软下硬富水砂层、富水砂砾地层	特殊环境、场所不能进行地面注浆,而洞内注浆不满足地表沉降要求、周围环境影响小、自动化程度高	工期较长	造价高 效益低
管片壁后深孔注浆法	适用于各类复杂地层,一般用于工后沉降控制	施工速度快,安全程度高,地面扰动小,盾构机要求低,但注浆孔的存在导致潜在漏水点增多,无法减小盾构推进时沉降	工期短	成本低

2.2 三轴搅拌桩预加固技术与工艺

2.2.1 加固范围及加固方式

针对本工程中的软流塑地层,根据上述比选,盾构掘进前对该地区采用850@600三轴搅拌桩加固,搅拌桩形式为格栅式,沿单线

隧道纵向设置5排长桩,间距2.4 m,沿隧道横向每间距1.5 m设置一排短桩,长桩加固范围为隧道拱顶上3 m至隧道拱底部持力层1 m;短桩加固范围为隧道拱顶以上3 m至隧道底部3 m,如图1所示。

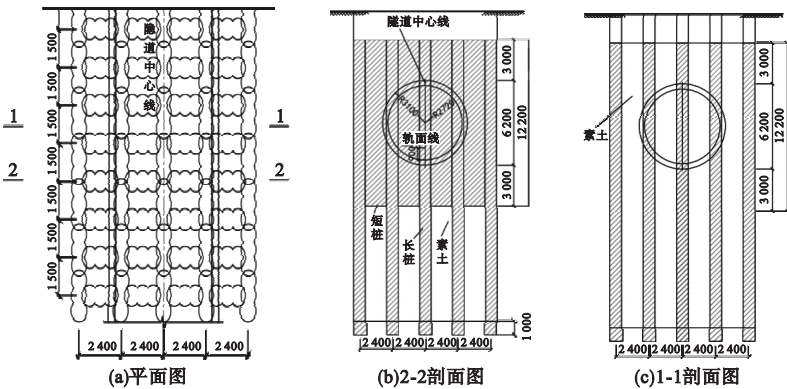


图1 三轴搅拌桩加固方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reinforcement method for triaxial mixing pile

2.2.2 盾构掘进参数控制

在深厚软土地层中,盾构掘进时须合理选择土仓压力,若土仓压力过大可能会引起地表隆起,压力过小会引起开挖面失稳,出现较大地表沉降。土仓压力值取1.0~1.3倍静水压力与地层压力之和,并在掘进中不断调整压力大小。笔者以盾构隧道埋

深为21 m时展开研究,盾构掘进具体参数见表2。

在实际盾构施工中,盾构掘进速度受到地质条件、盾构设备出土速度的约束,应与地表的允许沉降隆起控制值、刀盘面的土压平衡、出土量等参数相协调,笔者选取推进速度为30~40 mm/min。

表2 盾构掘进主要工作参数表

Table 2 Main working parameters of shield tunneling

掘进模式	总推力/kN	扭矩/(kN·m)	刀盘转速/(r·min <sup>-1</sup> )	土仓压力/kPa	螺旋机转速/(r·min <sup>-1</sup> )
土压平衡式	22 000	1 500 ~ 2 500	1 ~ 1.5	190	6 ~ 12

3 盾构隧道掘进变形控制数值模拟

3.1 三维数值模型建立及边界条件

创驹区间沿线地层变化不均匀,土层分布不均匀。笔者根据最不利条件选取盾构穿越全断面软土区域,利用 Plaxis 3D 有限元分析软件建立盾构掘进数值模型,考虑尺寸和

减小边界效应对盾构掘进的影响,选取 3~5 倍隧道直径的土体作为盾构施工影响范围,隧道埋深为 21 m,确定计算模型的长宽高为 66×60×45 m (XYZ);模型内土层简化为三层。模型底面为完全固定,侧面为法向固定,上表面为自由约束。X 方向为垂直隧道掘进方向,Y 方向为平行隧道掘进方向。三维数值模型如图 2 所示。

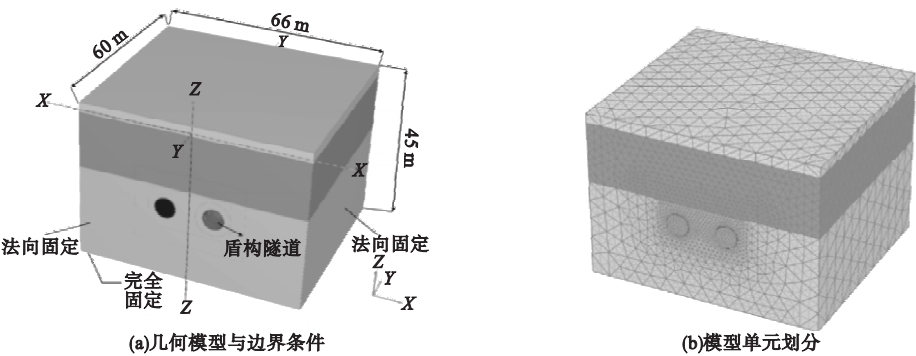


图2 三维数值计算模型

Fig. 2 Three dimensional numerical calculation model

3.2 模型及参数取值

选用小应变硬化本构模型(HSS模型),该模型不仅能考虑软黏土的硬化特性,且能模拟加卸载条件下土体的刚度差异,计算结果相对合理。建模时,三轴搅拌桩加固体选用摩尔-库伦模型,混凝土衬砌管片(厚0.35 m,幅宽1.5 m)选用线弹性模型,由于平衡压力对土体变形的影响为短期效应,故材料性状态取为不排水,相关参数来自工程地质勘察报告

以及室内试验对比分析结果。参考借鉴其他典型软土地区 HSS 模型参数和相关文献<sup>[16-18]</sup>等小应变硬化模型参数研究成果,最终确定佛山软流塑土层的 HSS 参数,相同参数取值:参考应力  $P^{ref} = 100$  kPa,加卸载泊松比  $\nu_{ur} = 0.2$ ,剪胀角  $\psi = 0.1^\circ$ ,破坏比  $R_f = 0.9$ ,初始剪应变  $\gamma_{0.7} = 10^{-4}$ ,不同参数取值见表 3,主要结构计算参数取值及模型选取见表 4。

表3 土体分层及模型参数

Table 3 Soil stratification and model parameters

土层	厚度/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c'/\text{kPa}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$K_0$	$m$	$E_{S1-2}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{S0}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$
人工填土	3	18.2	10	15	0.74	0.5	4.04	4.04	6.06	32.32	80.8
2-2 淤泥质粉细砂	13	17.3	5	25	0.65	0.5	3	3	4.5	24	60
2-1B 淤泥质土	29	17.1	9	10	0.74	0.5	2.5	2.5	3.8	20	50

注:  $\gamma$  为土体重力密度;  $c'$  和  $\varphi'$  分别为土体的有效黏聚力和有效内摩擦角;  $K_0$  为初始静止侧压力系数;  $m$  为应力相关幂指数;  $\nu_{ur}$  为卸载泊松比;  $E_{S1-2}$  为固结试验 100~200 kPa 对应的压缩模量;  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$  为切线模量;  $E_{\text{S0}}^{\text{ref}}$  为割线模量;  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  为卸载模量;  $G_0^{\text{ref}}$  为小应变剪切模量。



表4 加固体及主要结构计算参数

Table 4 Calculation parameters of added solids and main structures

结构名称	材料模型	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/ $10^4\text{ MPa}$	泊松比
盾构机盾壳	线弹性	120	2.3	0
混凝土管片	线弹性	27	3.1	0.1
水泥土加固体	摩尔库伦	20	0.02	0.2

盾构区间采用分段施工法对盾构推进进行模拟。假定初始应力场为重力场,具体施工阶段模拟过程如下:

施作三轴搅拌桩,通过改变加固区土体参数的方式,用实体单元模拟三轴搅拌桩;通过杀死和激活单元来模拟盾构推进过程,激活盾构机面收缩来模拟推进过程引起的地层损失,杀死隧道内部土体模拟隧道开挖,施加掌子面压力来模拟盾构机工作面的平衡压力,盾尾后一环激活表面压力来模拟注浆压力,防止土体坍塌,激活衬砌单元模拟隧道管片。

3.3 地表沉降测点布置

为监测隧道上方纵向与横向地表竖向位移量,纵向监测点沿“创一驹”方向在双线隧道的中心线上方每隔 10 m 布置一个,“NDJ17”表示第 17 断面左线正上方测点;横向监测断面每隔 50 m 布置,共布置 16 个监测横断面。测点以双线隧道中心线左右对称布置,分别距中心线 2 m、7 m、12 m、22 m、37 m。本研究主要对隧道全断面穿越淤泥

质土且下覆深厚软土的典型断面进行分析。现场竖向位移监测采用精度为 0.1 mm/km 的精密数字水准仪,监测范围选定为盾构切口前方 20 m、切口后方 50 m 范围。在盾构切口前方,设切口至测点或监测断面的距离为  $L$ ,隧道直径为  $D$ ,当  $L < D$ ,  $5D \geq L > 3D$ ,  $L > 5D$  时,监测频率分别为 1 次/d, 1 次/2d, 1 次/(3 ~ 5 d);在盾构切口后方,当  $L < D$ ,  $5D \geq L > 3D$ ,  $L > 8D$  时,监测频率分别为 (1 ~ 2) 次/d, 1 次/(1 ~ 2) d, 1 次/(3 ~ 7) d。

3.4 数值模拟及实测验证分析

实际工程施工时,盾构隧道周围软弱地层格栅式三轴搅拌桩加固宽度为双线隧道拱腰外侧 3 m,加固深度为隧道拱顶以上 3 m 至隧道拱底以下 3 m。根据实际工程建立数值模拟,对格栅式三轴搅拌桩加固后的土体进行盾构施工模拟,加固后盾构掘进时典型断面地表实测数据与数值模拟结果对比验证如图 3 所示。图中监测点与切口的相对距离小于零表示盾构机达到监测点之前,大于零表示盾构机通过监测点;竖向位移负值表示沉降,正值表示隆起。由图 3 可知,地表横断面位移曲线符合 Peck 沉降槽规律,在双线隧道左右两侧监测点范围内,沉降槽成 V 字型,最大值往先行左线隧道方向偏离,数值模拟竖向位移与实测的发展规律基本相同,两种曲线形态和沉降量大小基本一致,说明数值模拟方法正确合理。

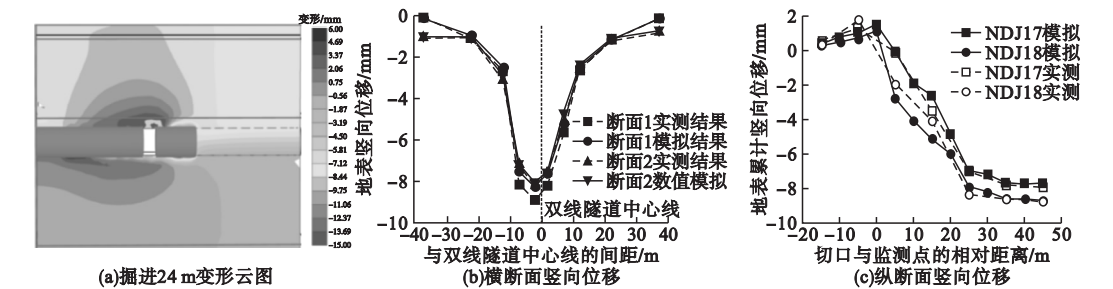


图3 盾构穿越后地表竖向位移实测与模拟结果

Fig. 3 Measured and simulated results of surface vertical displacement after shield crossing

3.5 盾构掘进规律及地面加固效果分析

由图3可知,实际地表沉降曲线对称轴偏左线隧道(先行隧道),且沉降槽形态不对称,近似为V型,与文献[18]计算结果一致,左线隧道最终沉降量大于右线,且总沉降最大值偏向左侧,这是由于先行左线隧道掘进过程中的同步注浆及二次注浆对周围土体起到了加固作用,提升了周围土体的稳定性及强度,因此先行左线隧道对地表沉降产生的影响大于后行右线隧道。

图4为地表纵向沉降实测与模拟曲线,各监测点竖向位移在数值上存在一定的差异,这是因为加固与不加固土层条件的差异以及盾构通过时施工参数的不同,但曲线整体形状大体相同,可分为盾构到达前、通过时的地面变形、通过后的地面瞬时变形和地面后期固结变形四个阶段。

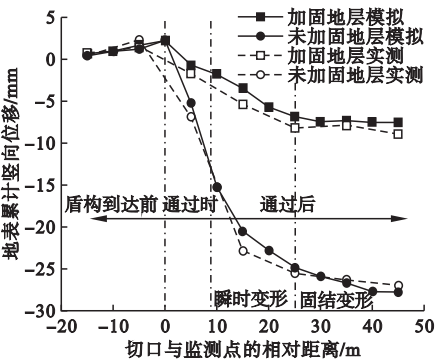


图4 地表纵断面竖向位移沉降实测与模拟曲线  
Fig. 4 Measured and simulated vertical displacement curves of surface longitudinal section

盾构机通过前,由于土仓压力略大于掌子面平衡压力,地表产生轻微隆起。盾尾刚通过时,地表沉降快速增大。这是因为盾构施工对周围土体的扰动以及管片脱离盾构机产生的盾尾空隙未及时注浆所引起的土体坍塌,导致地表产生较大沉降量和较快沉降速率。此时增大盾尾同步注浆压力可使周围土体应力得到一定的平衡,地表沉降量得到一定的控制;在盾构掘进通过测点25 m后,由于盾尾注浆体强度的增大,地表沉降速率减慢且沉降逐渐稳定,但是隧道周边土体还会

有一段时间的持续沉降,主要包括固结沉降和蠕动沉降两部分,占总变形量的5%~25%。在深厚软流塑土体地层中,地表沉降主要发生在盾构通过时盾尾管片脱出后,盾构机和管片之间产生空隙致使地层沉降及后期土体固结沉降。

由图4可知,未加固土体的地表累计最大沉降量为27.7 mm,加固后土体地表最大沉降量为8.9 mm,减少为未加固的32.1%,可见三轴搅拌桩格栅式加固效果明显,有效减少了盾构掘进对地表沉降的影响。

4 数值模拟敏感性分析

4.1 加固范围对变形的影响

三轴搅拌桩加固范围对地表变形的影响可分为不同加固宽度和深度对其影响,为研究加固范围对地表变形影响,固定加固深度为隧道拱顶以上0.5 D(D为隧道直径)至隧道拱底以下0.5 D,横向加固宽度分别取双线隧道左右两侧0.4 D、0.5 D、0.8 D、1 D、1.2 D;固定隧道两侧加固宽度为1 D,纵向加固深度分别取为隧道底部以下0.3 D、0.4 D、0.5 D、1 D。通过分别改变加固宽度和深度进行数值计算得到不同地表竖向变形(见图5、图6),并进行对比分析。

由图5(a)、5(c)可知,当加固深度为隧道拱顶以上0.5 D至拱底以下0.5 D时,加固宽度由0.4 D增加到0.5 D时,地表沉降减小量较大;加固宽度为0.5 D~1 D时,随加固宽度增加地表沉降最大值呈线性减小;而当加固宽度达到1 D后再增加加固宽度时,地表最大沉降基本不变,因此合理的加固宽度应为双线隧道两侧0.5 D~1 D。

由图5(b)可知,未加固土体地表最大沉降量为27.7 mm,土体由未加固到加固宽度为0.5 D时,隧道地表沉降减少到未加固的39.6%,可见三轴搅拌桩加固效果显著;当加固宽度为0.5 D~1 D时,地表最大沉降值随加固宽度增加呈线性减小,地表最大沉降值仅为未

加固的32.5%。由此可见增大加固宽度可有效减小地表沉降,且当加固宽度达到 $0.5D$ 后再增加加固宽度时地表沉降减少量较小。因此合理的加固宽度应为隧道两侧 $0.5D$ 以上。

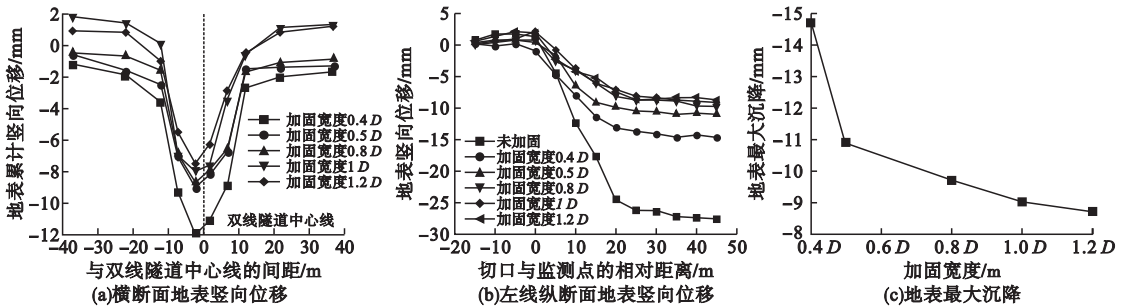


图5 加固宽度与地表竖向位移关系曲线

Fig. 5 Relation curve between reinforcement width and surface vertical displacement

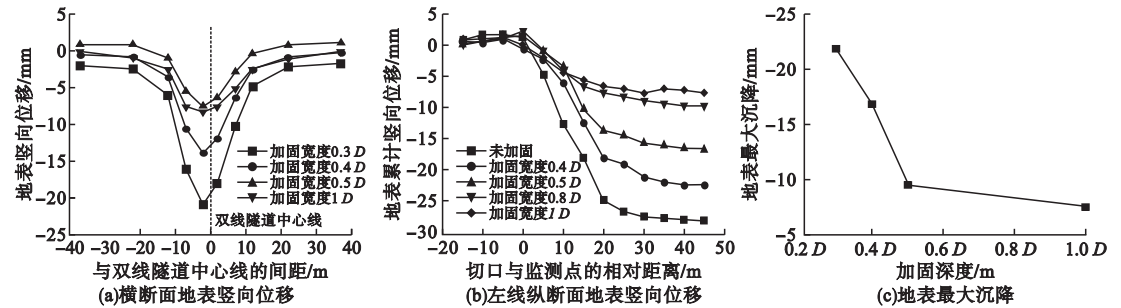


图6 加固深度与地表竖向位移关系曲线

Fig. 6 Relation curve between reinforcement depth and surface vertical displacement

由图6(a)可知,当改变加固深度时,横断面的地表沉降曲线形态仍符合Peck曲线,当加固深度为 $0.3D$ 时,地表沉降较大且横断面地表沉降最大值为未加固( $27.7\text{ mm}$ )的75.5%,说明加固体的加固深度过小时不能较好控制隧道和地表土体的沉降量。而当加固深度达到 $0.5D$ 时,横断面地表沉降的最大值仅为 $8.3\text{ mm}$ ,为未加固的30%,此时可有效控制隧道横断面的变形;加固深度由 $0.5D$ 增加到 $1D$ 时,地表沉降的减少量较小,减少率仅为9.3%,可见隧道加固深度到达一定时,再增加其深度对地表变形的影响较小,可以忽略。

由图6(b)可知,不同加固深度纵断面地表竖向位移曲线基本形态大致为反“S”形。土体由未加固到加固深度为 $0.3D$ 时,地表沉降为未加固( $27.7\text{ mm}$ )的79.1%,原因是加固深度较小,土体抗力和强度不足;当加固深度由 $0.3D$ 增加到 $0.5D$ 时,地表沉降减

少较为明显,为未加固的34.3%;当加固深度从 $0.5D$ 增加到 $1D$ 时,纵断面地表沉降的减小缓慢,可知隧道加固深度到达一定时,再增加其深度对纵断面地表沉降影响较小,可以忽略。

通过图5(a)与图6(a)对比分析得出加固深度对地表变形的影响大于加固宽度对地表变形的影响,可见地表沉降对加固深度的敏感性大于加固宽度。由图6(c)可知,地表沉降均随加固深度的增加而迅速减小。

综上,格栅式三轴搅拌桩预加固后,对地表沉降抑制有明显效果,在考虑施工及经济成本的情况下,三轴搅拌桩加固范围应合理控制,其加固宽度应控制在隧道两侧 $0.5D\sim 1D$ ,加固深度应控制在隧道拱顶 $0.5D$ 以上至拱底 $0.5D$ 以下。

4.2 隧道埋深对变形的影响

取隧道中心线埋深分别为距地表9 m、12 m、15 m、18 m、21 m,即相当于隧道埋深

为 $1.5D$ 、 $2D$ 、 $2.5D$ 、 $3D$ 、 $3.5D$ ,据此建立数值模型进行计算,并分析得出合理的隧道埋深以减小对地表变形的影响(见图7)。监

测点按前文所述布置,并在横断面上进行了加密,分别在距双线隧道中心线左右两侧17 m、27 m处增加布设监测点。

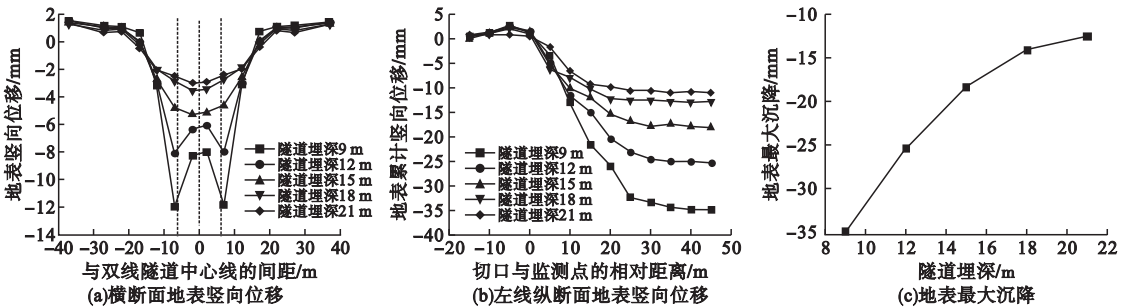


图7 隧道埋深与地表竖向位移关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between tunnel buried depth and surface vertical displacement

由图7(a)可知,当隧道埋深为15 m、18 m、21 m时,地表沉降曲线符合Peck曲线分布;隧道埋深为9 m、12 m时,即埋深小于 $2D$ 时,地表沉降曲线变化规律为近似W型曲线,与文献[18]中的分析基本吻合,说明隧道埋深较浅时左右线隧道掘进对地面变形的影响叠加效应较大;当埋深大于 $2.5D$ 时,横断面地表沉降曲线符合Peck沉降曲线规律,呈V字型。从图中可知,随隧道埋深的增加地表沉降最大值逐渐减小,且隧道对地表的影响范围逐渐增大。

由图7(b)可知,轴线上地表竖向位移随隧道埋深增加逐渐减小;切口后方25 m,地表竖向位移基本不变,当隧道埋深由9 m增加到12 m时,地表竖向位移量减少了9.2 mm;而当隧道埋深由18 m增加到21 m时,地表竖向位移量仅减小1.9 mm,表明随着隧道埋深增加,地表竖向位移的变化速率逐渐减小,当达到一定埋深后,其对地表竖向位移的影响将稳定在一定值。

由图7(c)可知,随隧道埋深的增加地表沉降最大值呈衰减性减小,地表沉降最大值随隧道埋深的增加而逐渐趋向于稳定在一定值上,当隧道埋深大于 $3D$ (18 m)后,曲线趋于平缓,地表最大沉降增长量变化不大。

5 结 论

(1) 双线隧道掘进时,对地表沉降的影响左线先行隧道大于右线,沉降最大值偏向先行隧道一侧,沉降槽呈Peck曲线分布;当隧道埋深小于 $2D$ 时,地表沉降槽呈近似W型。

(2) 三轴搅拌桩加固对地表沉降控制效果显著;合理的加固深度及宽度分别为隧道拱顶上部 $0.5D$ 到拱底下部 $0.5D$ 和隧道左右两侧各 $0.5D\sim1D$ 。

(3) 地表最大沉降值随隧道埋深增加逐渐减小,并趋于稳定,当隧道轴线埋深大于18 m( $3D$ )后,地表竖向位移变化趋于稳定。

参考文献

[1] 陈仁朋,曾巍,吴怀娜,等.盾构隧道下穿引起砌体结构建筑沉降损伤实例研究[J].岩土工程学报,2020,42(12):2301-2307.  
(CHEN Renpeng, ZENG Wei, WU Huaina, et al. Case study of tunnel-induced settlement and damage of masonry buildings [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2020, 42 (12): 2301-2307.)

[2] 王立新.盾构超近距离穿越大型立交桩基群影响研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(3):761-768.  
(WANG Lixin. Research on the influence of shield closely passing through the pile foundations of large interchange [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2016, 12 (3): 761-768.)

[3] 张旭辉,邢懿,杨平.大盾构隧道施工对周边敏感性建筑物的影响研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(6):1539-1544.



- (ZHANG Xuhui, XING Yi, YANG Ping. Research about the effects of shield driving in tunnel construction on surrounded sensitive buildings [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11 (6): 1539 - 1544. )
- [4] BILOTTA E, PAOLILLO A, RUSSO G, et al. Displacements induced by tunnelling under a historical building [J]. Tunnelling and underground space technology, 2017, 61: 221 - 232.
- [5] XIE X Y, YANG Y B, JI M. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shield-driven tunnel in Shanghai, China [J]. Tunnelling and underground space technology, 2016, 51: 120 - 132.
- [6] 路平, 郑刚, 雷华阳, 等. 盾构掘进参数的统计试验与优化控制[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(10): 1062 - 1070.  
(LU Ping, ZHENG Gang, LEI Huayang, et al. Statistical experiment and optimal control on driving parameters in shield tunnel [J]. Journal of Tianjin university (science and technology), 2016, 49(10): 1062 - 1070. )
- [7] DENG X H, WANG B L. Analysis of influence of shield tunneling crossing underneath intercity railway and shield tunneling parameters optimization [J]. Applied mechanics and materials, 2013, 2545 (353/354/355/356): 1619 - 1624.
- [8] YANG H, LU Z X, ZHANG Z Q. Parameters of slurry shield tunneling in the upper-soft lower-hard ground [J]. International core journal of engineering, 2021, 7(10): 468 - 476.
- [9] PENG H, DONG Z Y, LIU Y L. Research on deformation influence of shield under crossing the existing metro double shield tunnel [J]. Advanced materials research, 2014, 1065 - 1069: 378 - 382.
- [10] XU Y G, JI C, ZHOU S H, et al. Influence of strata pre-reinforcement on the tunnel and the surrounding strata while shield tunnel crosses beneath intercity high-speed rail [J]. Applied mechanics and materials, 2013, 2308 (303 - 306): 2859 - 2865.
- [11] 刘国栋, 袁冯丹, 许超. 软土地层盾构穿越密集房屋群水平定向注浆加固技术[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(7): 1228 - 1235.  
(LIU Guodong, YUAN Fengdan, XU Chao. Horizontal directed grouting reinforcement technology for shield crossing underneath concentrated building group in soft soil stratum [J]. Tunnel construction, 2018, 38(7): 1228 - 1235. )
- [12] 赵宇辉, 杨平, 王宁, 等. 下穿车站交叠区域MJS + 水平冻结加固解冻温度场研究[J]. 林业工程学报, 2021, 6(4): 159 - 166.
- ( ZHAO Yuhui, YANG Ping, WANG Ning, et al. Study on MJS + horizontal freezing reinforcement and thawing temperature field in the overlapping area of the underpass station [J]. Journal of forestry engineering, 2021, 6(4): 159 - 166. )
- [13] 杨龙, 徐海清, 李长冬, 等. 武汉软土地区盾构施工地面沉降与注浆加固研究[J]. 人民长江, 2021, 52(3): 131 - 136.  
( YANG Long, XU Haiqing, LI Changdong, et al. Research on settlement of ground surface and grouting reinforcement of shield construction in soft soil region of Wuhan [J]. Yangtze river, 2021, 52(3): 131 - 136. )
- [14] 孟庆坤, 徐国元. 土体加固范围对既有盾构隧道轨道的影响分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 174 - 180.  
( MENG Qingkun, XU Guoyuan. Influence analysis of soil reinforcement range on existing shield tunnels orbital [J]. Journal of Henan polytechnic university (natural science), 2022, 41(1): 174 - 180. )
- [15] 唐志辉. 地铁盾构隧道近接下穿既有铁路隧道加固范围优化设计 - 以南宁地铁4号线下穿既有铁路隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(8): 1185 - 1191.  
( TANG Zhihui. Optimization design of reinforcement range when a metro shield tunnel crossing underneath an existing railway tunnel: a case study on Nanning metro line 4 crossing underneath existing Chalu tunnel [J]. Tunnel construction, 2020, 40(8): 1185 - 1191. )
- [16] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土HSS模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269 - 278.  
( LIANG Fayun, JIA Yajie, DING Yujin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39(2): 269 - 278. )
- [17] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833 - 845.  
( GU Xiaoqiang, WU Ruituo, LIANG Fayun, et al. On HSS model for Shanghai soils with engineering verification [J]. Rock and soil mechanics, 2021, 42(3): 833 - 845. )
- [18] 魏纲, 王霄. 基于统一解的近距离双线平行盾构地面沉降计算[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 87 - 95.  
( WEI Gang, WANG Xiao. Calculation of ground settlements induced by the construction of twin parallel shield tunnels with small intervals based on the uniform analytical [J]. Modern tunnelling technology, 2017, 54(2): 87 - 95. )
- (责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)