

文章编号:1005-0523(2018)02-0016-08

# 淤泥填海地层近距离交叠隧道施工影响及控制分析

饶竹红,刘建国

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

**摘要:**针对淤泥填海地层中的近距离交叠隧道工程,利用三维有限元软件 PLAXIS 数值模拟,计算了新建盾构隧道施工对周边环境的影响。施工将引起的临近既有线上浮 14 mm,造成地表沉降变形 69 mm,无法满足盾构施工变形控制要求。为有效控制盾构施工对周边环境的影响,必须对淤泥填海地层进行加固。采用二维有限元法分析了不同加固范围对隧道附加变形的影响,提出了淤泥填海地层的针对性加固方案:隧道两侧 3 m 范围内的淤泥填海地层采用高压旋喷桩全深度加固。经计算,加固条件下既有线上浮变形和地表沉降较未加固条件分别能减小 44 %和 86 %。由此可知,在淤泥填海地层中,提出的加固方案能有效控制施工引起的环境变形,减小施工影响。

**关键词:**隧道工程;地层加固;数值模拟;PLAXIS

**中图分类号:**U455.43 **文献标志码:**A

随着我国城市化进程的快速推进,尤其是大城市的发展,带来了以地铁建设为主的地下交通和地下空间综合利用的大发展。在这种背景下,在城市繁华地区或某些地段,由于受地上、地下既有建筑物以及地下综合利用的限制,近距离交叠隧道施工工程越来越不可避免。

软土地区的近距离交叠隧道工程,无论采用何种方法都会改变地层的原始应力状态,使隧道周围土体出现卸载或加载等复杂力学行为,从而对隧道周围地层产生一定程度的扰动,造成地层中孔隙水压力变化、土体强度降低,最终导致地层变形。而隧道施工对周边土体扰动造成的地层变形,又相当于既有隧道支承条件发生了变化,这就可能使既有隧道发生较大变形,影响到既有隧道的结构服役性能和行车安全。目前,对于近距离交叠隧道施工影响问题已有大量研究<sup>[1-5]</sup>,而对淤泥填海地层中的近距离交叠隧道施工影响的研究相对较少。淤泥填海地层中的近距离交叠隧道问题,由于该地层具有明显的“三高三低”特性,即:高含水量、高压缩性、高灵敏度、低强度、低密度、低渗透性,盾构施工对周边地层和临近既有隧道的影响均较大,仅通过施工控制往往很难达到周边环境变形控制要求,常需辅以地层加固措施来共同控制施工影响。而由于工程地质的差异性,以往工程中的施工影响和地层加固控制分析只能参考而不能完全照搬。

本文结合深圳地铁 5 号线南延线航海路站—桂湾站区间小净距斜上跨既有 11 号线盾构隧道工程,对淤泥填海地层近距离交叠隧道施工影响进行了分析,计算了不同加固范围对隧道附加变形的影响,并据此提出了针对性的地层加固控制措施。通过计算表明,提出的加固措施能有效控制盾构施工引起的地层变形和临近隧道变形,可为以后类似地层中盾构工程施工影响和控制分析提供参考。

收稿日期:2018-10-28

基金项目:国

作者简介:饶竹红(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向为城市轨道交通。

通讯作者:刘建国(1975—),男,讲师,博士,主要研究方向为铁道与城市轨道交通。

# 1 工程背景

## 1.1 工程概况

深圳地铁 5 号线南延线航海路站—桂湾站区间位于深圳市前湾区的桂湾片区,该区定位为展示前海合作区整体城市形象的核心商务区。目前除在建的华润和卓越基坑外,其余均为空地,地铁线路建成通车后将迎来大规模基础建设和地块开发。航桂区间在 ZAK-1+485~ZAK-1+698.1 区段以 8°~17°角度斜上跨既有 11 号线南山站~前海湾站区间隧道,两线最小净距为 2.0 m,其中结构净距 $\leq 3.0$  m 的重叠段线路长度约为 70 m,上跨段线路平面布置、立面布置分别如图 1、图 2 所示。

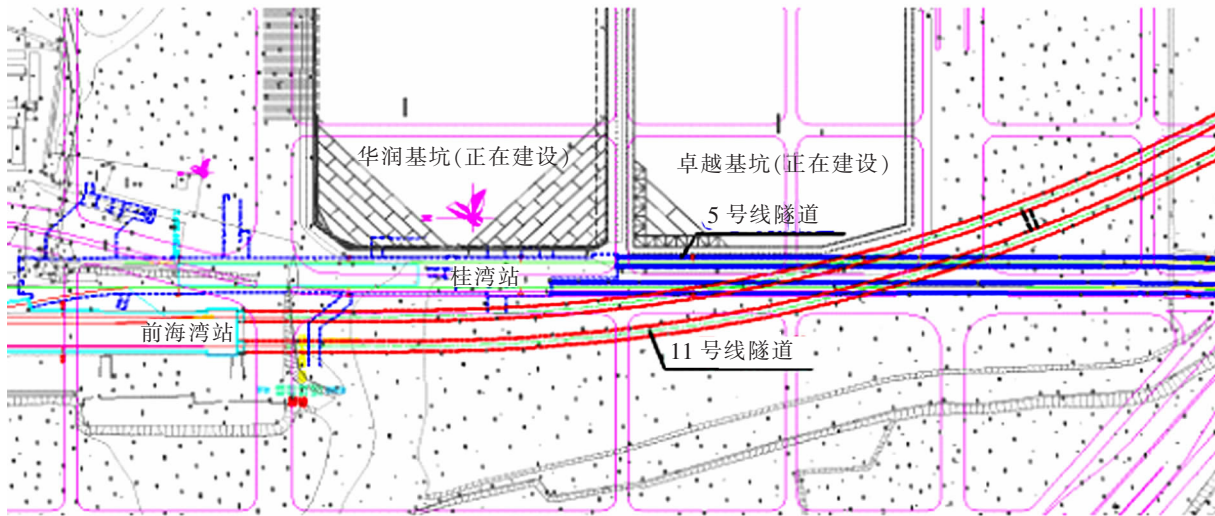


图 1 上跨段线路平面布置图  
Fig.1 Plan view of cross section line

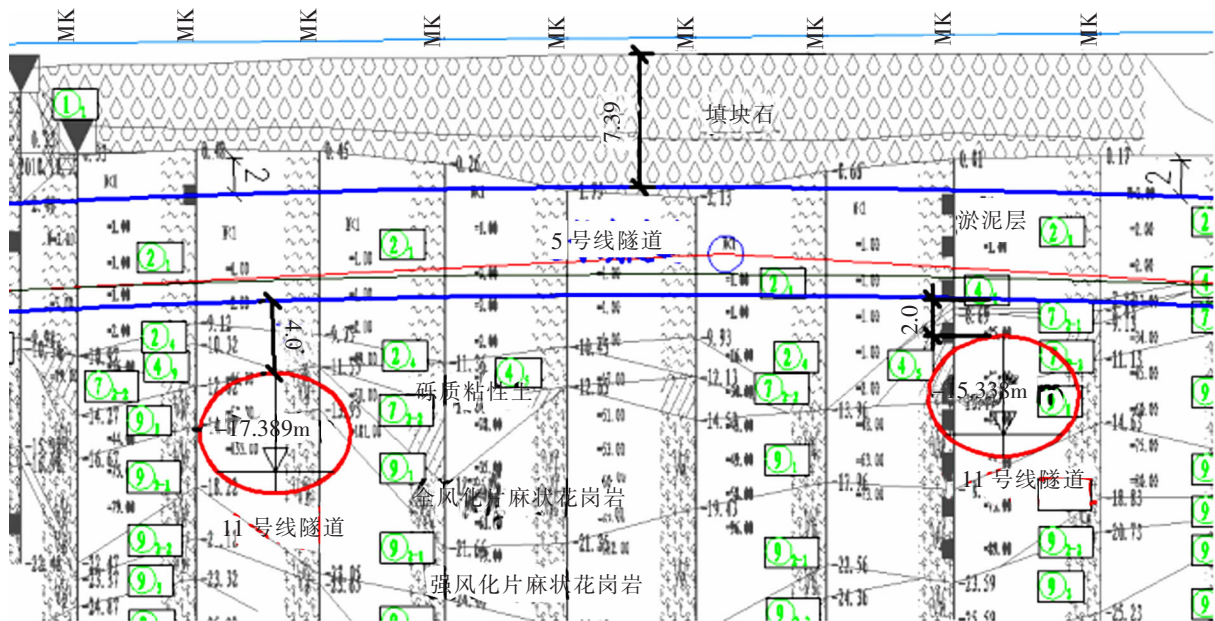


图 2 上跨段线路立面布置图  
Fig.2 Elevation view of cross section line

## 1.2 工程地质

5 号线穿越土层为淤泥填海地层,该地层是典型的饱和软土,在深圳西部沿海地区广泛分布。属于第四系全新统海陆交互沉积层,呈灰黑色,流塑、局部软塑状态,土层天然含水量为 69.5 %,空隙比 1.826,压缩模

量仅为 1.8 MPa,承载力特征值只有 45 kPa。

盾构隧道在此软弱地层中掘进施工,轴线易发生较大偏移,管片脱出盾尾易发生上浮,导致施工控制困难,隧道拼装成型质量难以保证。且周围土层受盾构隧道施工扰动后期易变形且变形量值大,导致既有 11 号线隧道和新建 5 号线发生较大变形,影响其结构服役性能和行车安全。上跨区段隧道地质纵断面见图 3,各土层物理力学参数如表 1 所示。

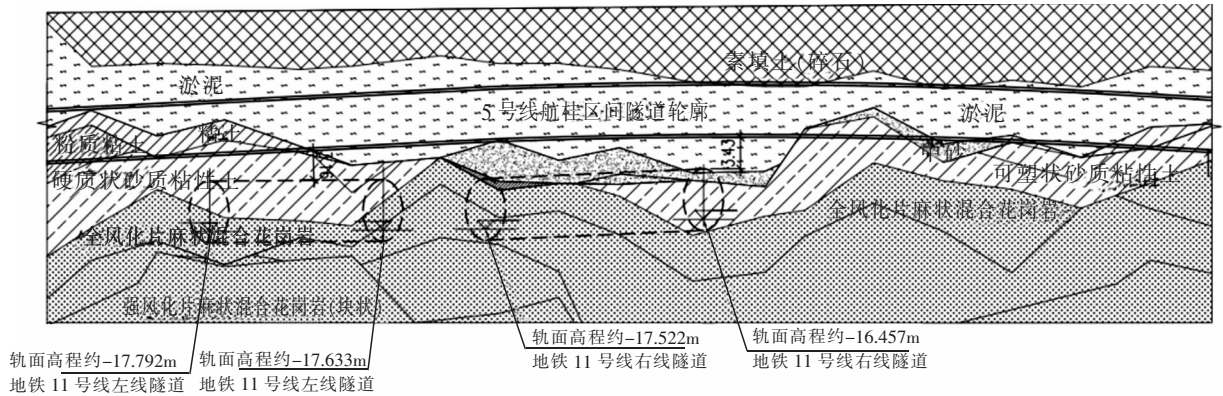


图 3 上跨段隧道地质纵断面图

Fig.3 Longitudinal section of cross section shield tunnel

表 1 土层物理力学参数表

Tab.1 Physico-mechanical index of soil layer

土层编号	土层名称	重度 $\gamma/$ (kN/m <sup>3</sup> )	天然含水量 $\omega/$ %	孔隙 比 $e$	粘聚力 $c/$ kPa	内摩擦角 $\varphi$ $/$ ( $^{\circ}$ )	压缩模量 $E_s/$ MPa	承载力特征值 $/$ kPa
① <sub>1</sub>	素填土	17.5						
② <sub>1</sub>	淤泥	15.6	69.5	1.826	10	4.5	1.8	45
⑦ <sub>2-2</sub>	硬塑状砂质黏性土	18.6	29.3	0.884	27.5	25	9	260
⑨ <sub>1</sub>	全风化混合花岗岩	19	23.6	0.782	35	26.5	13	330
⑨ <sub>2-1</sub>	强风化混合花岗岩	19.5	18.6	0.707	40	28.5	17	550
⑨ <sub>3</sub>	中等风化混合花岗岩	25.5						2 000

## 2 隧道施工影响分析

### 2.1 计算模型

采用三维有限元软件 PLAXIS 对隧道施工影响进行分析计算。考虑到边界效应,模型尺寸为 310 m $\times$ 150 m $\times$ 46 m,如图 4 所示。模型底部完全固定,四个侧面施加法向约束,顶面采用自由边界。模拟中隧道管片和盾壳采用板单元模拟,注浆层采用实体单元模拟。由于注浆材料的强度会随时间的增加而增加,模拟中将浆液分为两种材料:① 凝结前浆液,其刚度较低弹性模量取 0.5 MPa;② 凝结后浆液,其刚度较高弹性模量取 2.0 MPa<sup>[6]</sup>。为兼顾模拟精度和计算效率,一个计算步模拟盾构往前掘进 3 环,盾构机后 3 环注浆材料考虑为凝结前浆液,而 3 环以后注浆材料为凝结后浆液。同步注浆压力和掌子面压力分别通过垂直作用在注浆环衬砌及对应位置土体上的分布面荷载来模拟,不考虑注浆压力沿隧道纵向的衰减。

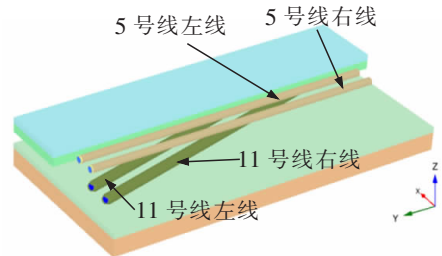


图 4 隧道施工影响分析模型

Fig.4 Tunnel construction impact analysis model



### 2.2 施工影响分析

5号线的施工过程,可主要划分为6个施工工况。工况一:5号线右线施工至11号线右线上方(5R-11R);工况二:5号线右线施工至11号线左线上方(5R-11L);工况三:5号线右线贯穿(5R贯穿);工况四:5号线左线施工至11号线右线上方(5L-11R);工况五:5号线左线施工至11号线左线上方(5L-11L);工况六:5号线左线贯穿(5L贯穿)。

通过模拟计算,既有线竖向变形和地表沉降变形如图5~图7所示。图5为11号线左线隧顶竖向变形曲线,阴影区域为5号线与11号线交叉对应范围。从图中可知,受5号线卸载回弹影响,11号线表现为隆起。施工完成时,11号线最大隆起变形约为14mm,发生在两线隧道交叉处,并随着距交叉位置的增大变形逐渐减小。

图6为地表竖向位移随盾构施工变形曲线。从图6中可知,在淤泥填海地层中施工,5号线盾构隧道施工将造成5L交11L横断面地表产生约69mm的沉降变形,最大变形发生在5号线左右线线路中心线处,且随着距中心线距离增大而变形减小。按30mm的盾构施工地表沉降控制值计,施工造成的地表变形已严重超限,盾构施工将给周边环境带来隐患。图7为5号线左线交11号线左线对应横断面布置图。

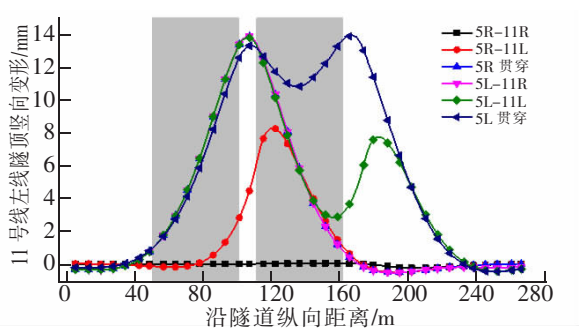


图 5 既有线隧顶竖向变形曲线

Fig.5 Vertical deformation curve of the existing tunnel

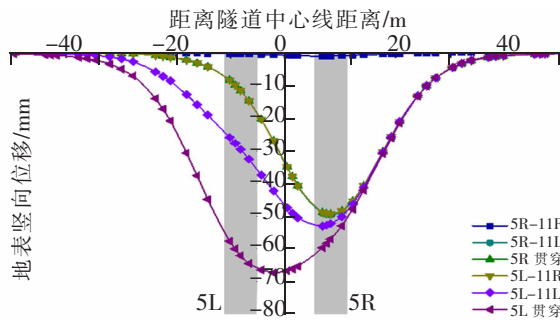


图 6 隧道相交横断面地表竖向变形图

Fig.6 Surface vertical deformation in cross section

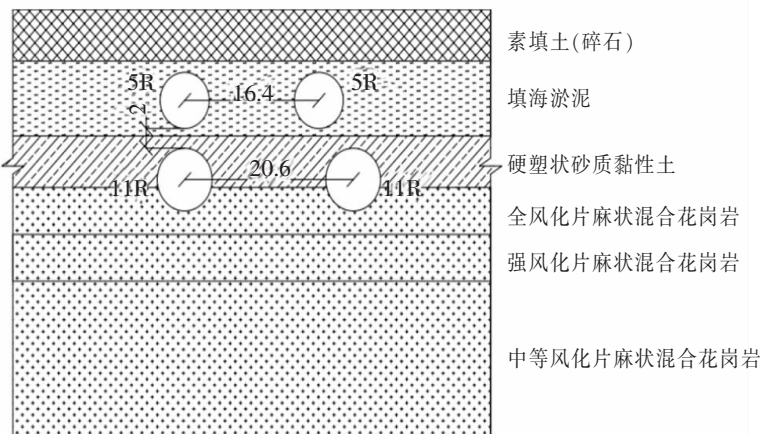
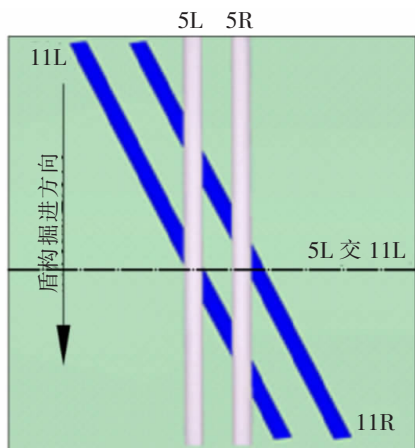


图 7 隧道相交横断面布置图

Fig.7 Diagram of tunnel in cross section

### 3 地层加固分析

根据第 2 节的模拟结果可知,盾构施工对周边土层的扰动大,将造成 11 号线大范围上浮和地表超限沉降。而由于淤泥填海地层“高三低”的性质,施工时无论采用何种方法都避免不了对周边土体的扰动,仅靠施工参数控制,很难达到变形控制效果。因此隧道施工时为有效控制下卧 11 号线变形和地表变形,有必要对淤泥填海地层进行加固。

同时上跨区段处于规划中的核心商务区,未来将面临大规模的基础建设和地块开发,周边地块开发等施工带来的加卸载作用又将对运营期的5号线和11号线产生影响。而淤泥填海地层极为软弱,其能提供的抵抗隧道收敛变形的抗力很小,将使隧道在运营期发生较大的收敛变形。由此,考虑到运营期隧道变形控制,淤泥填海地层也有必要进行加固。

### 3.1 地层加固范围分析

为研究不同加固范围对隧道附加变形的影响,选取5号线左右两线与11号线均相交的断面,建立二维有限元模型。横向加固范围分别取为5号线隧道左右两侧3,4,5,6及8 m,竖向加固范围分别取为从淤泥土顶部至淤泥土底部以下0.5,1及2 m,同时建立不加固的计算模型,加固与未加固的模型如图8(1)、(2)所示。模型中施加竖向的均布荷载20 kPa,以模拟后期隧道上方的加载作用。

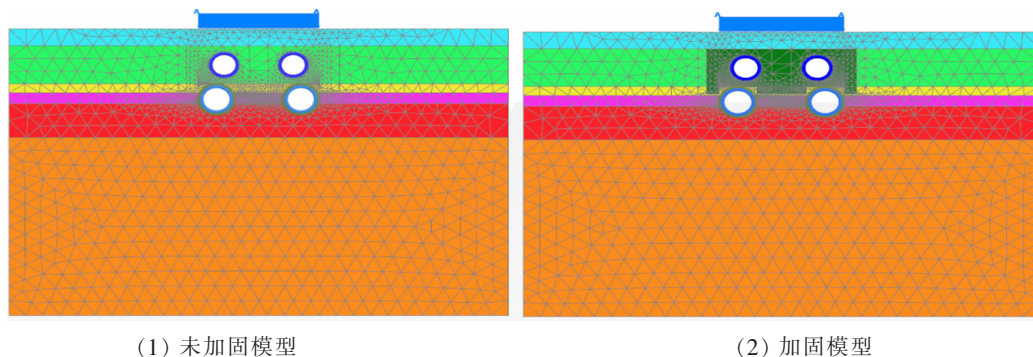


图8 加固范围分析计算模型图

Fig.8 Reinforcement range analysis model

图9(1)为当加固深度为从淤泥土顶部至底部以下2 m、加固宽度为5号线隧道左右两侧3,4,5,6及8 m时,计算得到不同加固宽度对5号线隧道水平直径变化率的影响,其中定义隧道直径变化率(归一化量)=加固后的变形量/未加固条件下的变形量。由图9可知,当加固宽度为3 m时,土体加固后隧道水平直径变化率为未加固条件下的0.45左右,说明土体加固能有效提高隧道周围土体的支撑作用,进而提高隧道抗变形能力,减小外部变载条件下的隧道变形。当加固宽度小于4 m时,随着加固宽度的增加,地表加载引起的隧道水平直径变化率减小显著;当加固宽度在4~6 m之间时,宽度增加,地表加载引起的隧道水平直径变化率有一定减小;而当加固宽度大于6 m后,加固宽度对隧道变形的影响几乎可以忽略。

当加固宽度为5号线隧道左右两侧3 m、加固深度为从淤泥土顶部至底部以下0.5,1及2 m时,计算得到不同加固深度对隧道水平直径变化量的影响,如图9(2)所示。由图可知,加固深度从淤泥层以下0.5 m提高到1 m甚至2 m,隧道的水平直径变化率基本保持不变,说明当将淤泥层全部加固后,提高加固深度不能提高隧道周围土体的支撑能力。

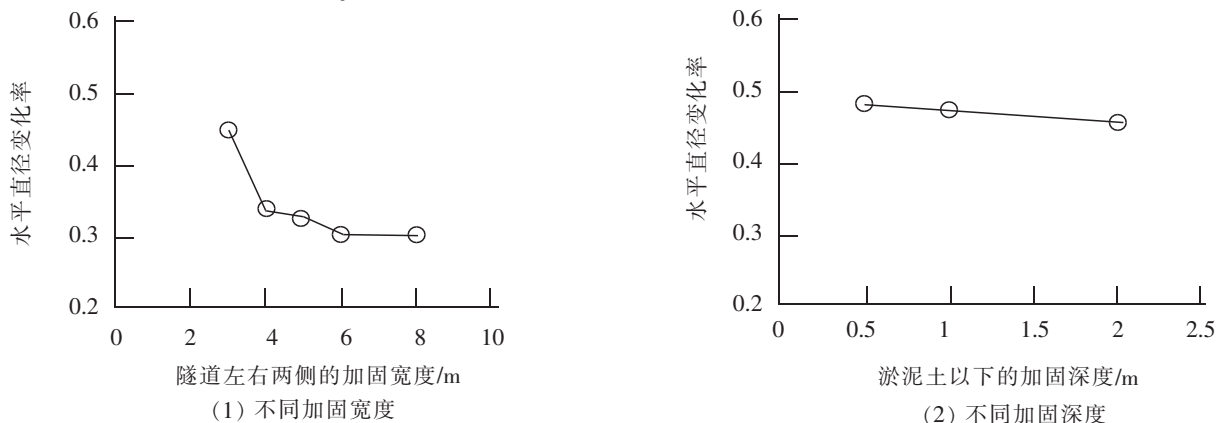


图9 不同加固范围对隧道水平直径变化率的影响

Fig.9 Effects of different reinforced range on tunnel horizontal diameter variation

### 3.2 地层加固方案

依据前面地层加固范围分析结果,可提出加固方案如下。横向上:5号线左右线隧道外 3 m 范围内采用直径 600 mm 双重管高压旋喷咬合桩(格栅状)加固淤泥填海地层。竖向上:由淤泥填海地层顶加固至淤泥填海层下 2 m;上跨 11 号线范围内,旋喷桩加固范围保持与既有隧道 1 m 净距,方案如图 10 所示。

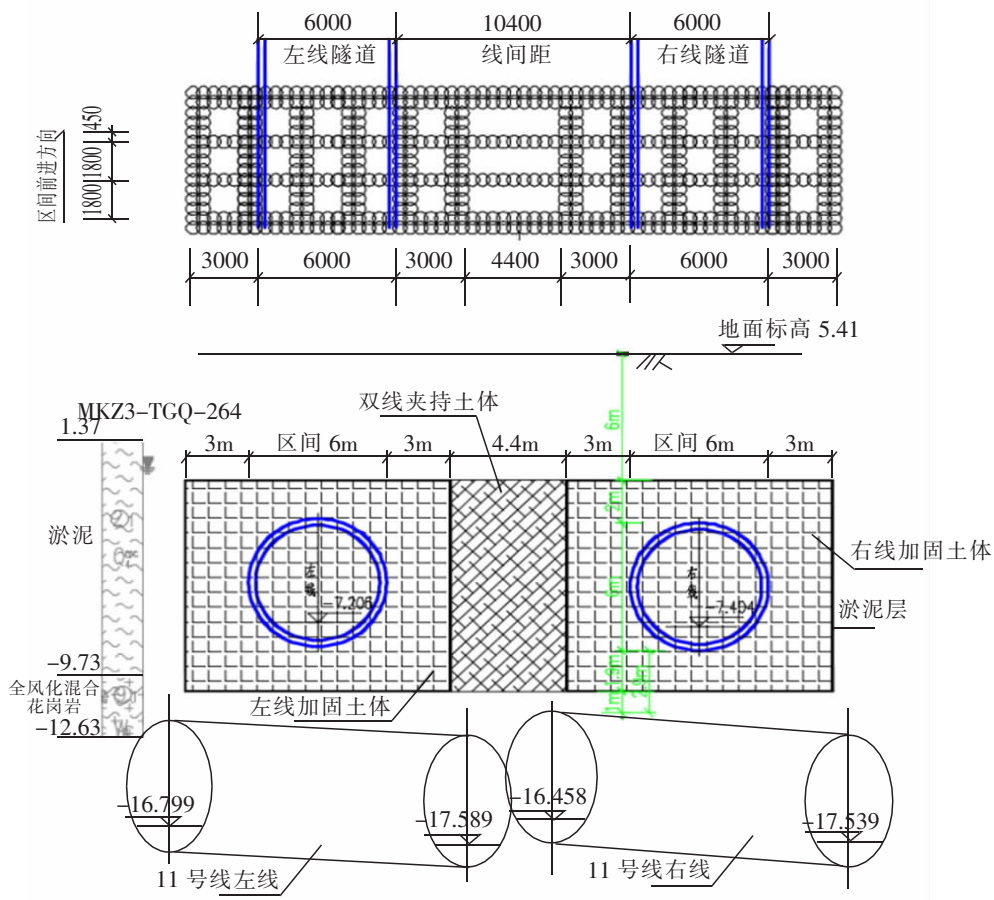


图 10 土体加固示意图

Fig.10 Diagram of the soil reinforcement

### 3.3 地层加固效果分析

对地层加固效果进行分析,主要目的是为了明确施工期,加固条件下既有线和地表的变形情况。结果分别如图 11 和图 12 所示。

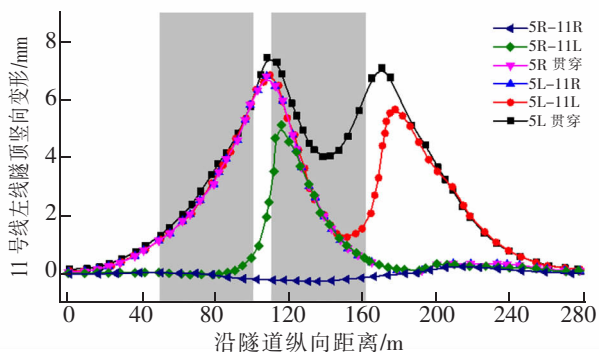


图 11 加固后既有线隧顶竖向变形曲线

Fig.11 Vertical deformation curve of the existing tunnel after reinforcement

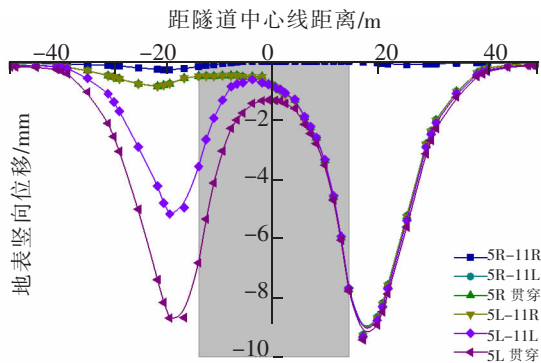


图 12 加固后隧道相交横断面地表竖向变形图

Fig.12 Surface vertical deformation in cross section after reinforcement



从图 11 可见,土体加固后 11 号线左线最大上浮为 7.8 mm,较未加固下变形小了 44%。说明加固对控制施工期 11 号线隧道上浮是有效的,可以减小施工对 11 号线的扰动。图 12 为加固后地表竖向变形曲线,图中阴影区域为 5 号线隧道加固范围对应地表。从地表沉降变形曲线可知,加固后地表最大沉降变形为 9.4 mm,而未加固条件下地表最大沉降约为 69 mm,加固后地表变形减小了 86%,表明地层加固对控制施工期地表变形十分显著。

## 4 结论

1) 对淤泥填海地层近距离交叠隧道工程采用三维有限元法建立模型,分析了新建盾构隧道施工引起的临近既有线变形和地表沉降变形。计算结果表明:淤泥填海地层中近距离交叠隧道施工,对下卧既有线和周边环境影响大,将造成既有线上浮 14 mm,引起地表沉降约 69 mm。

2) 为减小盾构施工对环境的影响和后期周边地块开发对运营隧道的影响,采用二维有限元法,对地层加固范围进行分析。结果表明:宽度上,当加固宽度小于 4 m 时,随着加固宽度的增加,地表加载引起的隧道水平直径变化率减小显著;当加固宽度在 4~6 m 之间时,宽度增加,地表加载引起的隧道水平直径变化率有一定减小;而当加固宽度大于 6 m 后,加固宽度对隧道变形的影响几乎可以忽略。深度上,将淤泥层全部加固后,提高加固深度不能提高隧道周围土体的支撑能力。

3) 采用高压旋喷桩对隧道两侧 3 m 范围内的淤泥填海地层进行全深度加固,11 号线上浮变形和地表沉降可较未加固条件分别减小 44%和 86%,分别为 7.8 mm 和 9.4 mm。该加固方案能有效的控制施工引起的环境变形,减小施工对 11 号线和地表的影响。

## 参考文献:

- [1] 孙王永,宋天田,周顺华. 软土地层近距离上穿既有隧道变形的数值模拟[J]. 华东交通大学学报,2007,24(4):36-38.
- [2] 王清标,蒋金泉,路林海,等. 不同开挖方式对近距离交叠隧道影响模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(10):2079-2087.
- [3] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1998, 13(3): 289-304.
- [4] 黄德中,马险峰,王俊淞,等. 软土地区盾构上穿越既有隧道的离心模拟研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(3):520-527.
- [5] 汪洋,何川,曾东洋,等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. 铁道学报,2010,32(2):79-85.
- [6] 汤继新,王柳善,季昌,等. 类矩形土压平衡盾构掘进引起的地层变形三维数值分析[J]. 华东交通大学学报,2016(1):9-15.
- [7] 房明,刘镇,周翠英,等. 新建隧道盾构下穿施工对既有隧道影响的三维数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报,2011,08(1):67-72.
- [8] 陈卫军,朱忠隆. 近距离交叠隧道研究现状及评析[J]. 现代隧道技术,2002,39(1):42-46.
- [9] 王渭明,李强,曹正龙,等. 不同埋深下近距交叠隧道施工地表变形研究[J]. 铁道标准设计,2015(10):123-128.
- [10] 孙钧,刘洪洲. 交叠隧道盾构法施工土体变形的三维数值模拟[J]. 同济大学学报自然科学版,2002,30(4):379-385.
- [11] 胡群芳,黄宏伟. 盾构下穿越已运营隧道施工监测与技术分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(1):42-47.

# Construction Influence and Control Analysis of Short Distance Overlapped Tunnel in Silt Reclamation Stratum

Rao Zhuhong, Liu Jianguo

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Aiming at the short distance overlapped tunnel in silt reclamation stratum, this paper explored the effects of the construction of the new shield tunnel on the surrounding environment by the 3D finite element software PLAXIS. The construction generated 14mm moving up for the existing tunnel, resulting in 69mm of surface settlement, which can not meet the deformation control of shield construction. In order to effectively control the impact of shield construction on the surrounding environment, the silt reclamation stratum must be reinforced. Then, the effects of different reinforcement range on the additional deformation of the tunnel were analyzed by 2D finite element method. A specific reinforcement scheme for the silt reclamation stratum was proposed. The silt reclamation stratum within 3m on both sides of the tunnel was reinforced with high-pressure rotary jet grouting pile in full depth. It was found that under the condition of reinforcement, the existing tunnel move-up deformation and surface settlement can be reduced by 44% and 86% compared with those without reinforcement. The research results show that in the silt reclamation stratum, the reinforcement scheme proposed can effectively control the environmental deformation caused by the tunnel construction and reduce the construction impact.

**Key words:** tunnel engineering; stratum reinforcement; numerical simulation; PLAXIS