

文章编号:1005-0523(2022)03-0054-07



盾构上穿既有隧道影响及加固分析

阮承志¹,石海斌²,于万友¹,黄大维²

(1. 中铁十九局集团轨道交通工程有限公司,北京 101300;

2. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心,江西 南昌 330013)

摘要:以某城市某地铁停车场出入线盾构隧道上穿下部既有盾构隧道工程为研究背景,针对新建隧道上穿既有隧道的施工工况,采用数值仿真软件模拟了施工中下部既有盾构隧道管片竖向位移情况,对既有隧道注浆加固后的隧道变形值进行分析,并提出加固建议。分析结果表明:新建隧道左线及右线的开挖对既有隧道产生的影响有较大差异,同时上部隧道的穿越角度影响既有隧道的沉降位移值,施工隧道线路正下方的既有隧道管片产生的竖向位移比斜下方的隧道管片大 5.3 mm。提出既有隧道加固方案并对其效果进行模拟分析,模拟结果显示加固后的隧道最大变形减小 3.2 mm,为 4.5 mm,小于规范控制安全标准 5 mm。在此基础上提出了钢支撑环与拱顶注浆相结合的隧道加固方案,并在施工现场进行实施。

关键词:城轨交通;轨道交通;地下铁道;铁道工程;地铁隧道

中图分类号:U455

文献标志码:A

本文引用格式:阮承志,石海斌,于万友,等. 盾构上穿既有隧道影响及加固分析[J]. 华东交通大学学报,2022,39(3):54-60.

Analysis of the influence and reinforcement of shield passing through existing tunnel

Ruan Chengzhi¹, Shi Haibin², Yu Wanyou¹, Huang Dawei²

(1. China Railway 19th Bureau Group Rail Transit Engineering Co. Ltd., Beijing 101300, China; 2. Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the research background of the shield tunnel in a parking lot of an urban subway, According to the construction conditions of the new tunnel passing through the existing tunnel, the vertical displacement of the existing shield tunnel in the middle and lower part of the construction is simulated by numerical simulation, and the tunnel deformation value after grouting reinforcement of the existing tunnel is analyzed, Finally, the reinforcement suggestions are put forward. The analysis results show that the excavation of the left line and the right line of the new tunnel has a great difference in the impact on the existing tunnel. At the same time, the crossing angle of the upper tunnel affects the settlement displacement of the existing tunnel. The vertical displacement of the existing tunnel segment directly below the construction tunnel line is 5.3 mm larger than that of the tunnel segment diagonally below. The simulation results show that the maximum deformation of the strengthened tunnel decreases from 3.2 mm to 4.5 mm, which is less than 5 mm of the standard control safety standard. On this basis, a tunnel reinforcement scheme combining steel support ring and arch crown grouting is proposed, and the on-site construction is guided.

收稿日期:2021-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52078213);江西省青年科学基金重点项目(20192ACBL21003);江西省主要学科学术和技术带头人资助计划(20194BCJ22009)

Key words: urban rail transit; rail transit; subway; railway engineering; metro tunnel

Citation format: RUAN C Z, SHI H B, YU W Y, et al. Analysis of the influence and reinforcement of shield passing through existing tunnel[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(3): 54–60.

目前,国内外学者针对隧道穿越与施工影响方面已经做了一系列研究。杨芝璐等^[1],何川等^[2],王超东等^[3]研究了不同叠交角度下新建隧道对既有隧道的影响规律,发现载荷一定的情况下叠交角度越小,既有隧道变形越大;张轩等^[4],Xia等^[5]利用数值仿真软件分析了隧道施工对沿线构筑物的影响;张斌等^[6]通过对地层损失率的研究,对大直径盾构隧道产生的应力释放与地表位移进行了分析研究;孙廉威^[7]通过改变模型参数研究了不同工况既有地下管线存在下的开挖面失稳机制。张岳强^[8],董礼^[9],Aygur等^[10],Liang等^[11]对盾构机穿越隧道与构筑物时产生的风险进行分析,并提出相应的解决办法。潘涛^[12]对盾构近距离上穿运营隧道的变形规律进行探索,综合考虑既有隧道的纵向与水平变形,提出了最佳的盾构掘进速度。王超东等^[13]采用室内模型实验模拟了新建隧道斜交既有隧道的工况,研究了施工对既有隧道自身结构及周围土体的影响。李小奇等^[14],吴凡^[15]基于不同工况提出了下穿施工时不同上部构筑物的加固方案,并对其加固效果进行了分析。

由于既有隧道埋设深度的限制,为了保证与既有隧道之间的安全距离,新建隧道下穿既有隧道工况较多,这也就导致目前的研究具有一定的局限性,大部分研究针对的是新建隧道下穿的工况,而隧道上穿的工况研究的较少。为此本文依托某城市某地铁停车场出入线盾构隧道上穿既有盾构隧道工程,考虑盾构机的超载作用,研究新建隧道上穿施工对既有隧道管片变形的影响,并对不同穿越角度下既有隧道的变形进行分析。同时结合模拟加固的分析情况,对现场施工提出了相应的加固措施。

1 工程概况

1.1 穿越段位置关系

某城市某地铁停车场出入线新建隧道采用明挖法与盾构法相结合的方式施工。先进行明挖段施工,在明挖施工完成后,接明挖段终点进行盾

构施工。盾构施工段左线隧道穿越既有隧道起点为管片L54环;右线隧道穿越既有隧道起点为管片R80环。出入线既有隧道为斜交状态,左右线起点处与既有隧道夹角约为 18° ,其终点处与既有隧道夹角约为 33° ,见图1。

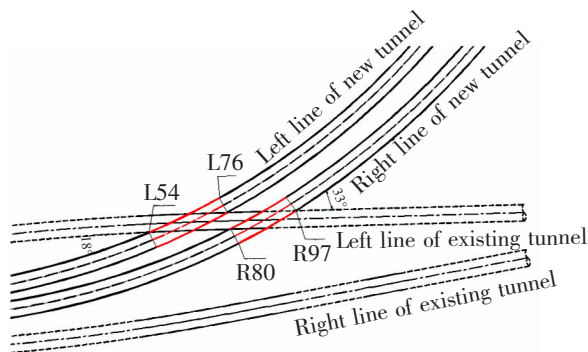


图1 新建隧道与既有隧道平面关系

Fig.1 Plane relationship between new tunnel and existing tunnel

整个盾构区间采用 $\varphi 6\ 280\ \text{mm}$ 土压平衡式盾构机进行施工,管片外径为 $6.0\ \text{m}$,内径为 $5.4\ \text{m}$,每环管片幅宽为 $1.2\ \text{m}$ 。为避免双线同时施工对下部既有隧道的影响产生叠加,尽量减小上部隧道施工对下部隧道造成的影响,采用双线分离的施工方法。左线从L54环先行施工,推进至L94环后,右线从R80环开始施工。

1.2 穿越地层环境

盾构区间所处地区为典型砂性土地层,地形相对平坦,区域地质构造较为稳定。区域土层种类较多,大致表现为上软下硬。经过现场勘测,将土层依次划分为杂填土、粉质粘土、细砂、砾砂、泥质粉砂岩,各土层物理力学参数如表1所示。工程穿越段地层条件较为复杂,穿越土层较多,穿越段土层分布及隧道剖面位置关系如图2所示。从图中可以看出,新建盾构隧道位于细砂层及砾砂层之间,既有盾构隧道整体位于砾砂地层中。新建隧道左右线间距为 $9.29\ \text{m}$,隧道竖向埋深 $8.5\ \text{m}$ 。新旧隧道之间距离较近,与下部既有正线隧道最小竖向净距 $2.8\ \text{m}$ 。

表 1 土层物理力学参数
Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layer

Material	Thickness/ m	Elastic modulus/ MPa	Poisson ratio	Density/ (kN/m ³)	Cohesion/ kPa	Angle of internal friction/(°)
Miscellaneous fill	0.8	8.5	0.3	18	12	6
Silty clay	4.5	30	0.3	20	22	15
Fine sand	5	35	0.3	20	0	30
Sandy gravel	13	46	0.28	21	0	35
Highly weathered argillaceous siltstone	1.3	60	0.26	22	35	38
Moderately weathered argillaceous siltstone	11.4	90	0.25	22	42	45

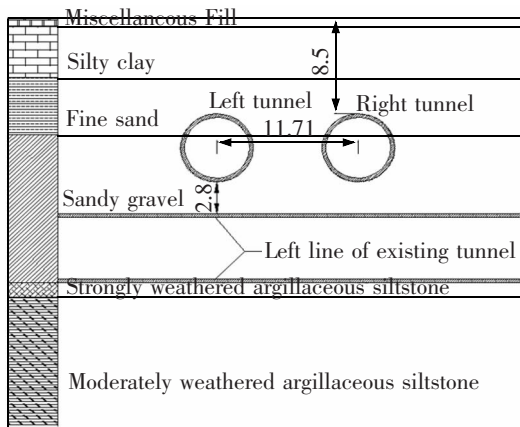


图 2 新建隧道与既有隧道地层关系图(单位:m)
Fig.2 Stratum relation diagram of tunnel(Unit:m)

2 盾构穿越数值模拟

2.1 模型建立与参数设置

根据新建隧道与既有隧道间的空间位置关系,采用有限元软件对穿越段施工过程进行模拟,研究盾构机上部开挖过程中不同相对位置的下部既有盾构隧道管片的变形情况。如图 3(a)所示,所建立的模型长、宽、高分别为 142,110,36 m。为了确保模型计算的准确性,土层设置参数均采用现场实测的土体参数,各层土体的具体参数及设置厚度如表 1 及图 1 所示。模型顶部设置为自由边界,对模型四周施加法向约束,对模型底部则同时施加法向及切向约束。为了能够合理地反映地层变化的趋势,消除常用的摩尔库伦本构卸载回弹导致地面隆起变形偏大的问题,采用修正摩尔库伦本构^[16]进行土体的模拟。

选取与既有隧道叠交并对既有隧道影响较大的环数建立对应的开挖模型,并模拟盾构机开挖过

程,如图 3(b)所示。模拟对应的实际环号为:左线 L54~L109 环,右线 R80~R135 环。现场施工时为避免双线同时施工对下部既有隧道造成影响过大,采用左线先行施工的双线分离施工模式。因此,模拟工况采用相同的施工方式,左线施工 40 环后右线再进行施工。实际工程中新建隧道对既有隧道左线与右线均有影响,为简化计算,仅选取与新建隧道叠交的既有隧道左线为研究对象,同时不考虑地下水渗流的影响。

根据模型内各部分的材料性质,模型内的土体及注浆层均采用实体单元进行模拟,盾构隧道管片及盾壳等采用板单元进行模拟。考虑到管片环的连接接缝对管片结构的影响,将横向管片刚度进行 0.85 倍的刚度折减进行计算^[17-18]。不考虑盾构刀盘的切削作用,采用板单元建立盾构机刀盘模型,模拟其对土体的支护作用。建立盾壳长度为 7.2 m,盾构隧道每次开挖 1 环管片,即每次开挖长度为 1.2 m。通过在盾壳单元钝化的同时设置对应的管片单元,模拟管片脱出盾尾的过程。在管片脱出盾尾的同时在管片外部的土体施加注浆压力,并赋予其浆液属性,模拟同步注浆对土层的影响。在既有隧道段上选取与新建隧道不同位置关系的 3 环管片作为研究对象,选取进行研究的既有隧道断面如图 3(b)所示,分别为位于新建隧道左线正下方的 135 环,位于左右两线之间的 153 环以及位于右线正下方的 162 环。通过选取 3 个典型断面,对既有隧道不同区域内的管片在不同施工阶段的变形进行模拟研究。由于设置施工阶段较多,为简化计算,选取接近 3 个断面的 100 环施工过程进行数据采集,即图 3(b)中利用绿色填充的 L54~L109 环以及 R80~R135 环。

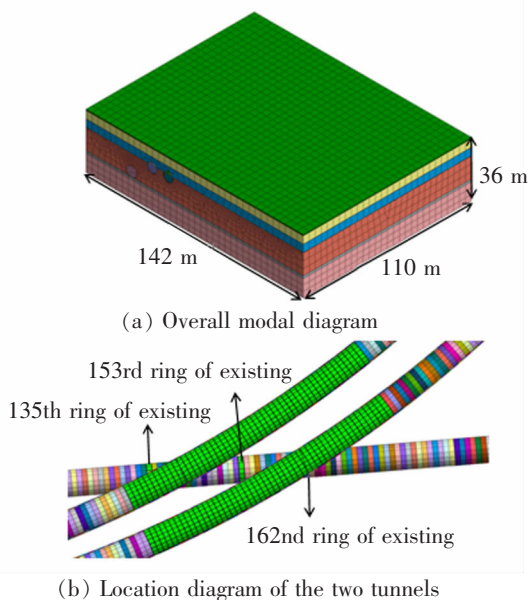


图3 盾构穿越有限元模型图

Fig.3 Finite element model of shield tunneling

2.2 模拟结果及分析

为研究上部隧道穿越施工对下部隧道不同区域的影响,选取既有隧道中3个典型断面的竖向变形值进行分析。对每环施工后3个断面的竖向变形值进行统计,可以得到不同施工环节不同位置的既有隧道的竖向变形曲线。

2.2.1 左线穿越影响

新建隧道左线盾构机先行施工,选择的模拟断面中左线的模拟环数为L54~L109,其中L54~L109环仅为左线施工,既有隧道仅受左线施工的影响,此时既有隧道的3个监测断面产生的竖向变形如图4所示。图4显示初始阶段盾构机开挖面位于新建隧道L54环,此时上部施工距离既有隧道135环较近,因此除135环竖向变形值较大,为1.5 mm以外,距离施工面距离较远的153环及162环竖向变形值基本为0。盾构机继续沿着左线推进,上部施工对下方土体及既有隧道结构产生扰动,在上部荷载的作用下既有隧道产生向下的竖向变形。随着开挖面逐渐接近既有隧道135环,当盾构机位于135环正上方(图中第5~11环)时,其竖向变形值迅速增大,最大变形值约为6.2 mm。而在上部施工的影响下,153环及162环也产生了不同程度的竖向变形,但从图中可以看出,其余两环受到的影响相对较小,距离开挖面最远的162环竖向变形并未超过1 mm。继续施工至第15环时,此时隧道产生的竖向变形

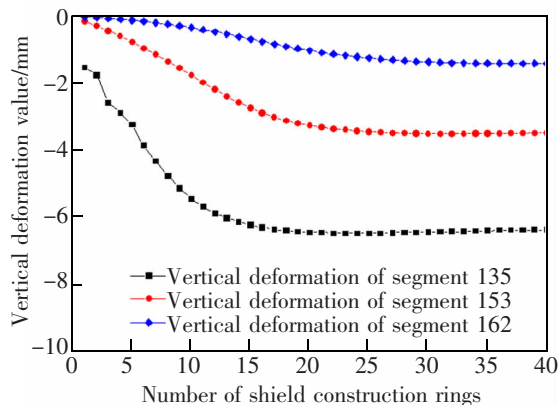


图4 左线施工竖向位移图

Fig.4 Vertical displacement diagram of left line construction

达到最大,为6.4 mm。如图4所示,盾构施工至第14~19环,新建隧道左线开挖面位于153环附近,从图3(b)可以看出153环位于新建隧道的斜下方,与新建隧道正下方的135环相比,由于叠交角度的不同,153环产生的竖向变形相对较小。同样的,当盾构开挖至162环上方(图4中第21~27环),也并未发生较大变形。当施工继续进行,距离监测断面一定距离后,随着施工断面逐渐远离,土体发生卸载回弹,既有隧道在竖直方向上会发生一定程度的回弹变形。以135环为例,当盾构掘进至16环后,既有隧道上方荷载减小并发生卸载,同时在一定程度上引起隧道整体回弹,从图中可以看出,至第40环开挖时,与之前相比,135环变形回弹0.5 mm。

3个监测断面所处的空间位置分布进行考虑,135环距离左线施工较近,并位于左线施工段正下方,153环及162环均距离较远,位于左线施工段斜下方,从盾构机分别开挖至3个监测断面最近点时对既有隧道产生的影响可以看出,新建隧道上穿施工时,对隧道正下方的叠交部分影响较为明显,对于斜交的部分影响较小。

2.2.2 右线穿越影响

当新建隧道左线施工至L94环,隧道右线施工至图5中的初始阶段,此后既有隧道同时受到左线施工与右线施工的同时作用。在右线施工的影响下,3个监测断面均迅速产生竖向变形。图5中43~50环为新建隧道右线施工至135环附近时监测断面的变形情况。此时开挖面位于135环斜上方,由于叠交角度的影响,与左线施工相比较而言,右线

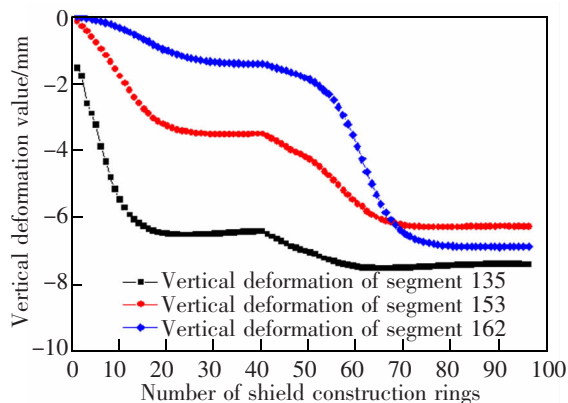


图5 全线施工竖向位移图

Fig.5 Vertical displacement diagram of whole line construction

施工产生的影响较小。右线继续施工至153环斜上方,即图5中的52~58环,此时153环受到右线施工的影响,产生了较大的竖向变形。与135环相比,153环与右线距离较近,因此其变形程度大于153环。而从162环右线开挖后产生的大幅度变形来看,位于右线正下方的162环受右线施工影响更大,由此可以看出,正下方的既有隧道管片受施工影响更为严重。与左线开挖类似的,3个监测环在盾构机远离后均会产生一定的卸载回弹,此时会令既有盾构隧道管片产生二次变形,不利于隧道防护。

3个监测环最终整体呈现相似的变化规律,其中盾构施工从正上方通过的135环及162环在对应施工时所产生的竖向变形较大,而位于两个施工段中间的153环产生的竖向变形较小。因此可以看出,叠交角度会对下穿隧道竖向位移产生较大影响,施工段正下方的隧道管片会受到更大影响,而斜下方的隧道受到的影响较小。根据此特点,可以选择性地对施工段正下方既有隧道进行加固,从而降低施工成本。

3 隧道加固模拟

3.1 既有隧道加固模拟

根据上述分析,左线及右线的开挖均会对既有隧道产生较大影响,为保证施工顺利进行,需要对既有隧道进行加固。采取注浆加固隧道后的土体以及加固隧道管片相结合的方法,并对此工况进行模拟分析。不考虑加固方法对既有隧道管片之间的连接产生的影响,对既有隧道管片加固后的刚度进行换算,采用1.5倍的管片刚度进行计算,同时在既有

隧道上方建立一层注浆区。隧道注浆加固模拟如图6所示,将现有隧道上部120°范围内的土体进行注浆加固,建立注浆加固层,并对加固后的隧道进行仿真分析。

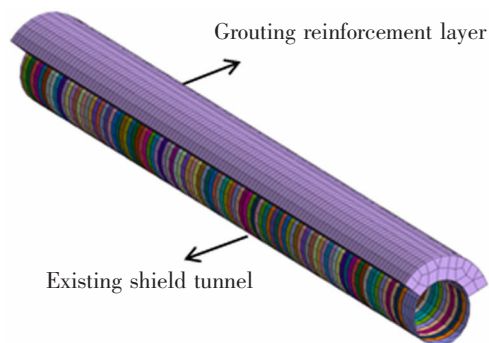


图6 隧道注浆加固模拟

Fig.6 Simulation of tunnel grouting reinforcement

如图7所示,为隧道加固后的竖向位移图。与加固前的竖向位移图进行对比,可以看出隧道整体变化趋势未有较大变化,且同样呈现出下沉趋势,3个检测断面的最终竖向变形分别为4.527,3.963 97,4.463 6 mm,相比较加固之前的最终竖向位移7.389 8,6.261 6 mm以及6.861 9 mm,可以看出其发生的竖向变形显著减小,说明该加固措施能够较为有效地抑制下部既有隧道的竖向变形。此外,从图7可以看出,3个监测管片环的最终竖向位移值更为接近,尤其是135环与162环,两者的竖向位移近乎相等。加固后的既有隧道竖向位移在施工完成后回弹趋势更小,而以135环为例,当右线施工远离隧道断面,图中65环后,回弹值与之前相比有所减少,可以看出加固措施可以较为有效抑制隧道的变形。

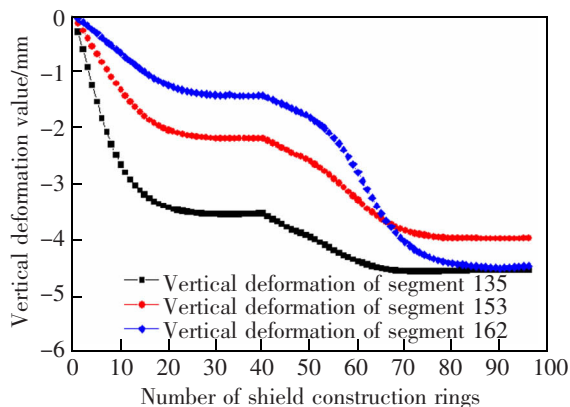
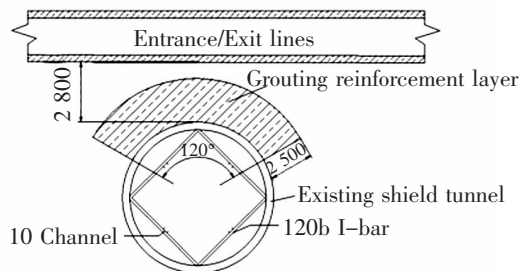


图7 加固后竖向位移图

Fig.7 Vertical displacement diagram after reinforcement

3.2 既有隧道管片现场加固

根据上述模拟结果,对既有隧道的加固提出建议,一般而言,加固主要包括隧道管片自身的加固以及隧道周围土体的加固。其中,隧道管片自身的加固可以增加管片的抗变形能力,减少隧道自身产生的变形。一般采用在已有支护的基础上再添加一层支护进行加固的方法,但是此方法人力物力耗费较大。考虑到本项目中既有盾构隧道仍未开通运营,因此在既有隧道内部布设由 20b 工字钢及 10 槽钢焊接而成的钢支撑环进行加固,如图 8 所示。既有隧道上部土体的加固可以降低上部施工对下部隧道的影响,为了加强既有隧道与新建隧道之间土体的强度,减小上部隧道施工对既有隧道的扰动程度,在既有隧道拱顶壁后 120° 范围内的土体进行了注浆加固,加固采用的浆液是水泥水玻璃双液注浆材料。



(a) Grouting reinforcement



(b) Measuring point layout

图 8 既有隧道加固及监测措施

Fig8 Reinforcement measures for existing tunnels

为了分析既有隧道控制变形措施的效果,在上部隧道开挖的同时,对下部隧道的竖向变形进行测量。在既有隧道每隔 4 m 的距离设置监测断面并利用全站仪对隧道变形进行观测,最终下部既有隧道产生的最大竖向变形约为 4.5 mm,与注浆加固模拟值较为接近,同时变形满足规范要求,加固方案效果良好。

4 结论

采用数值仿真方法,对盾构超载作用下上穿盾

构隧道这一特殊工况进行模拟,对不同叠交角度下的隧道变形状况进行研究,得出了以下结论。

1) 上穿既有盾构隧道时,盾构机开挖会使开挖面下方土压力变大,下部既有隧道受到向下的应力,双线同时开挖会增大既有隧道受到的影响,从而使隧道管片变形过大。为保证施工安全,应采取双线分离的施工方案。

2) 新建隧道与既有隧道的穿越角度是影响既有隧道的竖向变形的重要因素,施工段正下方既有隧道管片受到的影响更大,其纵向变形值也大于斜下方既有隧道管片,两者差值达到 5.3 mm。

3) 既有隧道在不进行加固的情况下会产生较大竖向位移,采用自身加固以及上部土体注浆加固可以大幅减小隧道变形,最终对 3 个模拟断面的变形值均小于规范控制安全标准 5 mm。

4) 根据加固的模拟结果,加固方案对隧道变形的保护具有较好的效果,在此基础上提出了钢支撑环与拱顶注浆相结合的隧道加固方案,并在施工现场进行实施。最终下部既有隧道产生的纵向变形约为 4.5 mm,加固效果良好。

参考文献:

- [1] 杨芝璐,张孟喜,肖晓春,等. 超大直径盾构不同角度下穿对既有地铁隧道的影响分析[J]. 铁道标准设计,2021,65(3):112-118.
YANG Z,ZH M X,XIAO X C,et al. Analysis on the existing metro tunnels affected by the super-large shield tunneling underneath at different angles[J]. Railway Standard Design,2021,65(3):112-118.
- [2] 何川,苏宗贤,曾东洋. 地铁盾构隧道重叠下穿施工对上方已建隧道的影响[J]. 土木工程学报,2008,41(3):91-98.
HE C,SU Z X,ZENG D Y. Influence of metro shield tunneling on existing tunnel directly above[J]. China Civil Engineering Journal,2008,41(3):91-98.
- [3] 王超东,赖鹏安,曹洋,等. 滨海软土地层盾构近接穿越角度对既有隧道影响的模型试验研究[J]. 现代隧道技术,2021,58(1):168-174.
WANG C D,LAI P A,CAO Y,et al. Model test study on the influence of the close crossing angles of overlapped shield tunnels on existing tunnels in coastal soft soils[J]. Modern Tunnelling Technology,2021,58(1):168-174.
- [4] 张轩,田奉鑫. 盾构隧道侧穿既有高层建筑基础的受力变形特性数值分析[J]. 四川建筑科学研究,2020,46(6):80-88.
ZHANG X,TIAN F X. Numerical analysis of the force and deformation characteristics of shield tunnels passing through the foundations of existing high-rise buildings[J]. Sichuan

- Building Science, 2020, 46(6): 80–88.
- [5] XIA W Y, ZHANG K J, HONG R L, et al. Study on the construction mechanical response of the double-shield TBMs of a long diversion tunnel crossing a fault fracture zone[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570(5).
- [6] 张斌. 基于应力释放的大直径盾构隧道地表沉降分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 137–142.
ZHANG B. Surface Settlement Analysis of Large diameter Shield Tunnel Based on Stress Release Rate[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(1): 137–142.
- [7] 孙廉威, 方宇翔, 沈雯. 下穿既有管线盾构开挖面失稳机制分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S1): 278–284.
SUN L W, FANG Y X, SHEN W. Numerical analysis on the shield excavation face instability under the existing pipeline[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 278–284.
- [8] 张岳强. 盾构机近距离上穿既有隧道施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(4): 82–85.
ZHANG Y Q. Construction technique of shield tunneling machine overpassing the existing tunnel at close range[J]. Railway Construction Technology, 2020(4): 82–85.
- [9] 董礼. 盾构小曲线半径下穿注浆加固建筑群分析[J]. 铁道建筑技术, 2020(3): 100–104.
DONG L. Analysis on grouting reinforced buildings for shield machine under passing in a small curvature radius [J]. Railway Construction Technology, 2020(3): 100–104.
- [10] AYGAR E B, GOKCEOGLU C. A special support design for a large-span tunnel crossing an active fault (T9 Tunnel, Ankara-Sivas High-Speed Railway Project, Turkey) [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(1): 37.
- [11] LIANG X, QI T Y, JIN Z Y, et al. Risk assessment system based on fuzzy composite evaluation and a backpropagation neural network for a shield tunnel crossing under a river[J/OL]. Advances in Civil Engineering; 1–7[2021-10-13]. <https://www.researchgate.net/publication/346059712>.
- [12] 潘涛. 盾构超近距离上穿诱发既有隧道纵向与水平变形研究[J]. 华南地震, 2021, 41(3): 33–39.
PAN T. Research on longitudinal and horizontal deformation of existing tunnel induced by shield tunneling in extra close distance[J]. South China Journal of Seismology, 2021, 41(3): 33–39.
- [13] 王超东, 赖鹏安, 曹洋, 等. 上下斜交盾构隧道施工净距对既有隧道影响的模型试验研究[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 231–236.
WANG C D, LAI P A, CAO Y, et al. Model test study on the influence of construction clearance of upper and lower oblique shield tunnels on existing tunnels[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(5): 231–236.
- [14] 李小奇, 王宁. 超小净距双线隧道掘进对先建隧道的影响[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(5): 10–15.
LI X Q, WANG N. Influence of ultra-small distance double-track tunneling on pre-built tunnel[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(5): 10–15.
- [15] 吴凡. 盾构下穿高架桥桩基的托换施工技术分析 [J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(2): 15–21.
WU F. Study on pile underpinning and removing technology of shield tunnel crossing through pile foundations of road bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(2): 15–21.
- [16] 张瑞金, 胡奇凡. 摩尔库伦和修正摩尔库伦本构有限元模拟结果对比分析[J]. 中国房地产业, 2015(8): 256–258.
ZHANG R J, HU Q F. Comparative analysis of the finite element simulation results of Moore Culle and modified Moore Coulomb[J]. China Real Estate Industry, 2015(8): 256–258.
- [17] 郭端, 何川. 盾构隧道管片衬砌结构稳定性研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(6): 74–81.
GUO R, HE C. Study on stability of segment lining structure of shield tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(6): 74–81.
- [18] 黄大维, 周顺华, 王秀志, 等. 模型盾构隧道管片纵缝接头设计方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1068–1076.
HUANG D W, ZHOU S H, WANG X Z, et al. Design method of longitudinal joints for model shield tunnel segments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1068–1076.



第一作者: 阮承志(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为地铁盾构隧道施工技术与管理。E-mail: 2458553997@qq.com。



通信作者: 黄大维(1984—), 男, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 铁道工程研究所副所长, 江西省“青年井冈学者”, 江西省杰出青年基金获得者。研究方向为地铁盾构隧道设计、施工与运维相关的理论与技术研究。E-mail: gddthdw@126.com。