盾构下穿已建隧道施工参数分析及监测

苑宝军[1]， 王毅恒[2]， 周丁恒[3]

(1. 西南交通大学 土木工程学院，四川，成都 610031；2. 四川理工学院 土木工程学院，四川，自贡 643000；
3. 中铁第五勘察设计集团有限公司，北京 102600)

摘 要：探讨了盾构下穿已建隧道全过程下土仓压力、同步注浆压力及注浆量、顶力及推进速度等盾构参数变化，并详细分析了已建隧道变形. 结论为：前 3 个参数是已建隧道变形的主要影响因素，为控制性指标；通过监测反馈，土仓压力建议为静止土压力的 1.5～1.8 倍，且小于主动土压力；同步注浆压力应控制在地层土压力范围内，注浆量应为盾尾间隙的 1.4～1.8 倍；推进速度要保持在均匀低速状态，以减小对周围土体的扰动和控制长期变形.

关键词：盾构；已建隧道；下穿；施工参数；监测

中图分类号：U 45 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-0645(2016)增刊 2-0159-05

DOI：10.15918/j.tbit1001-0645.2016.增刊 2.037

Parameters Analysis and Monitoring of Shield Undercrossing Existing Tunnel

YUAN Bao-jun[1]， WANG Yi-heng[2]， ZHOU Ding-heng[3]

(1. College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611031, China;
2. College of Civil Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China;
3. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., LTD, Beijing 102600, China)

Abstract: Soil warehouse pressure, synchronous grouting pressure and volume, shield thrust and advance speed of shield tunnel undercrossing existing tunnels were summarized. Existing tunnels deformation was analyzed. Conclusions are as follows. Firstly, soil warehouse pressure, synchronous grouting pressure and volume are main factors affecting existing tunnel deformation and control parameters for shield crossing. Secondly, soil warehouse pressure should be 1.5 to 1.8 times of static earth pressure and a little smaller than passive earth pressure. Thirdly, synchronous grouting pressure should be controlled in the range of formation pressure value and grouting volume should be 1.5 to 1.8 times of shield end clearance. Finally, advance speed should be in a low and uniform state.

Key words: shield; existing tunnel; undercrossing; construction parameter; monitoring

近年来，随着城市轨道交通不断发展，新建隧道下穿既有运营隧道的情况不断增多. 既有隧道施工时已对周围土体产生了扰动，新建隧道下穿将产生二次扰动，加剧土体变形和沉降，若防护措施不利，将导致既有隧道出现变形过大或衬砌破坏，影响运营安全. 因此，研究新建隧道下穿对既有隧道造成的影响，采取合适防护措施保障既有隧道安全，成为新建隧道施工必须解决的问题. 新建隧道施工方法可分为暗挖、盾构及顶管法，本文研究对象为新建盾构隧道，目前对盾构下穿已建隧道的研究方法主要有理论分析[1]、数值模拟[2]及室内或现场试验[3]，目前的研究工作主要针对是单一方法，少部分[4-5]采

收稿日期：2016－10－30
基金项目：四川省高校重点实验室开放基金项目(2014QYJ06)
作者简介：苑宝军(1972—)，博士，讲师，E-mail：97huashui@163.com.

用多种方法综合.

1 工程背景

某隧道长约15.05 km,分盾构和顶管2段,盾构和顶管长度分别为8.80,6.22 km. 盾构段下穿3条已建地铁,周边环境复杂,下穿控制要求高. 盾构隧道和该城市建成最早的一条地铁区间隧道位置关系如图1所示. 该条线路为最繁忙、最重要的线路,运营时间已超16年. 穿越土层为灰粉砂质粘土层,盾构顶部和区间隧道底部最小距离仅为6.60 m. 盾构下穿另外2条区间隧道情况与前者相似,文中将最早的隧道称为Ⅰ线,另外2条隧道称为Ⅱ、Ⅲ线.

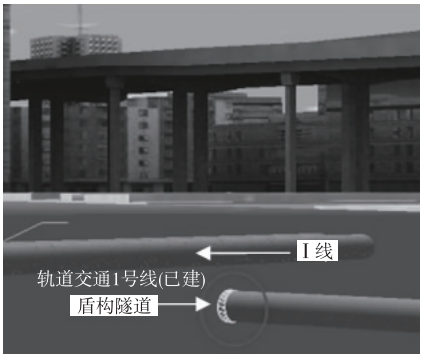


图1 盾构隧道与Ⅰ线隧道位置关系

Fig. 1 Position relation of shield tunnel and existing line Ⅰ

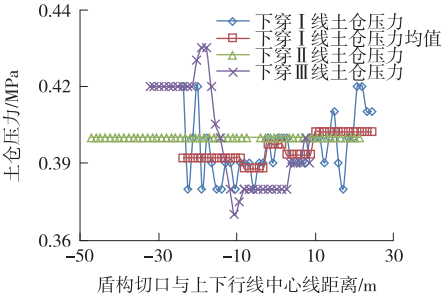


图2 土仓压力随推进距离变化曲线

Fig. 2 Soil warehouse pressure curves

2 施工参数分析

文中符号约定:X轴正向与盾构方向相反;Y轴为已建隧道变形,正值为沉降,负值为隆起.

2.1 土仓压力

土仓压力随盾构切口与上下行线中线的距离变化如图2所示(图2同时包括下穿Ⅰ线时土仓压力平均值变化曲线),Ⅰ线和Ⅱ线下、上行线轴线投射在X轴上坐标值为5.65 m和−5.65 m;Ⅲ线下、上行线轴线投射在X轴上坐标值为8.6 m和−8.6 m. 下穿Ⅰ线、Ⅲ线时,土仓压力随盾构推进不断变化;下穿Ⅱ线全过程压力始终为0.4 MPa. 下穿Ⅰ线时土仓压力特点:① 下穿前后土仓压力为0.38～0.42 MPa,大于建议的0.319～0.383 MPa;② 以中线为界限,分2阶段,2阶段变化趋势相似. 1阶段中,盾构至下行线范围,压力开始减小,通过后有所恢复. 2阶段中,进上行线范围,压力又开始减小,通过后有所恢复;③ 在下、上行线正下方时,压力为每阶段最小值;④ 监测显示穿下行线时下行线隆起较大,故盾构穿上行线时降低压力,最终压力均值要小于下穿前. 下穿Ⅲ线时,至下行线范围,压力以多阶梯状不断减小;过上行线后,压力由最小0.37 MPa迅速恢复至0.43 MPa以上,最终稳定在0.42 MPa.

2.2 同步注浆压力与注浆量

同步注浆压力随盾尾与上下行线中线的距离变化如图3所示(未监测下穿Ⅱ线、Ⅲ线时同步注浆压力). 同步注浆压力特点如下:① 在0.40～0.64 MPa范围变化,均值0.511 MPa,大于建议的0.42 MPa,远离Ⅰ线时,存在一定波动;② 至下行线范围时,压力未发生明显变化,至下行线轴线附近,压力快速上升,离开下行线进入上下行线中间段后,有一定减小;③ 至上行线范围后,压力一直处于减小的状态,至上行线轴线附近,压力为下穿全过程最小值.

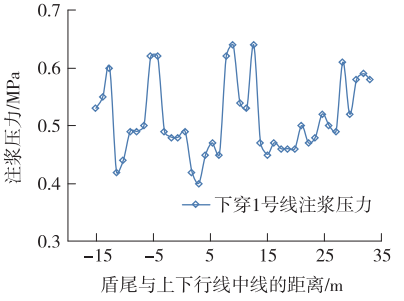


图3 同步注浆压力随推进距离变化曲线

Fig. 3 Synchronous grouting pressure curves

同步注浆量随盾尾与上下行线中线的距离变化如图4所示. 下穿Ⅱ线、Ⅲ线注浆量在3.5 m^3/环以上,大于下穿Ⅰ线注浆量. 下穿Ⅰ线时注浆量与注浆压力变化基本一致,区别在于穿后注浆量小于穿前,变化特点如下:① 下穿Ⅰ线全过程,注浆量在2.0～3.2 m^3/环范围内,均值为2.5 m^3/环,与建议的2.0～3.2 m^3/环基本一致,盾构远离Ⅰ线时,注

浆量有波动变化;② 至下行线范围后,注浆量开始减小,离开下行线至上下行中间区域后,注浆压力反弹;③ 至上行线范围后,注浆压力持续减小,过上行线轴线后趋于稳定. 下穿Ⅱ线时,在切口在达到上行线范围前,注浆量保持 3.5 m^3/环不变;切口进入上行线范围时,迅速增大;切口通过上行线轴线后,盾尾注浆量以阶梯状不断减小,最终稳定 3.5 m^3/环,与穿前相同. 下穿Ⅲ线时注浆压力变化相对简单,当切口过下行线轴线后,注浆量迅速降低后稳定,穿后注浆压力均值为 3.5 m^3/环,小于穿前 4.5 m^3/环.

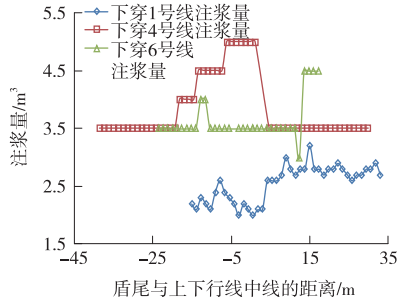


图 4　同步注浆量随盾尾与推进距离变化曲线
Fig. 4　Synchronous grouting volume curves

2.3　推力和推进速度

推力、推进速度随盾尾与上下行线中线的距离变化如图 5、图 6 所示,下穿Ⅰ线、Ⅲ线推力小于 2 200 t,小于穿Ⅱ线推力(最小超过2 800 t,最大超过3 600 t). 下穿Ⅰ线推力变化过程:(1)至下行线范围时,逐渐增大,推进至中线附近,达到最大值;(2)过中线后,逐渐减小,过上行线轴线后,继续减小,远离Ⅰ线后,仍有小幅波动. 下穿Ⅱ线时推力变化频繁,没有明显规律;下穿Ⅲ线时推力变化与Ⅰ线类似,不再赘叙.

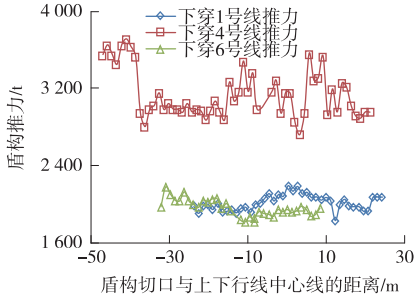


图 5　盾构推力随推进距离变化曲线
Fig. 5　Shield thrust curves with distance

下穿Ⅰ线全过程推进速度最大,其次是穿Ⅱ线,穿Ⅲ线速度最小,但在已建隧道下方时,速度相差并不大,表明下穿时需控制速度. 下穿Ⅰ线速度变化过程:① 在远离Ⅰ线区域时,保持在 30 mm/min 左右;② 当未到达下行线范围时,开始减小,至下行线轴线附近,为全过程最小值;③ 过下行线后,逐渐增大,上行线速度大于下行线,最大达到 40 mm/min. 下穿Ⅱ线与Ⅰ线类似,差别为下穿Ⅱ线变化小;而下穿Ⅲ线变化非常小,稳定在 9 mm/min.

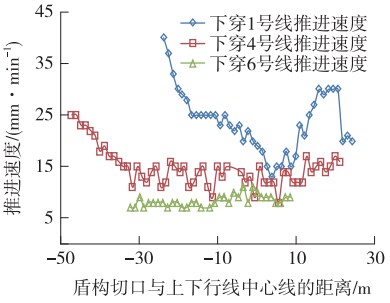


图 6　盾构推进速度随推进距离变化曲线
Fig. 6　Advance speed curves with distance

3　已建地铁隧道变形监测与分析

盾构正穿的 3 组隧道上下行线各位置均布置了测点,测试不同推进距离下隧道变形. 由监测发现,盾构正上方隧道位置测点变形最大,为控制点,故均以该位置处测点变形为分析对象.

3.1　下行线变形分析

推进时下行线变形随切口与上下行线中线的距离变化曲线如图 7 所示. 盾构引起Ⅰ线和Ⅱ线下行线隆起,而Ⅲ线下行线为沉降. Ⅰ线下行线隆起大于Ⅱ线隆起,原因是盾构与Ⅰ线距离小;Ⅲ线下行线沉降很大,最大接近 6.9 mm,超过了规定允许的 5 mm 限值,需采取相应控制措施,调整参数,减小沉降.

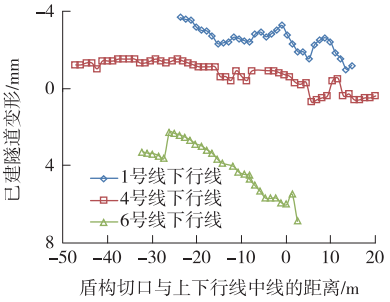


图 7　下行线变形随推进距离变化曲线
Fig. 7　Down-line deformation curves with distance

下穿过程中,Ⅰ线下行线大部分测点隆起,最大隆起点为盾构与Ⅰ线下行线正交点,极少数远离盾

构测点发生沉降，Ⅰ线下行线最大隆起为3.678 mm，最大沉降为0.056 mm. Ⅰ线下行线变形特点：① 当盾构距离下行线2 m时，下行线最大隆起为2.5 mm；② 参考土仓压力及同步注浆参数情况，当切口至下行线范围时，下行线最大隆起减小，减小是因为土仓压力由0.40 MPa减小至0.38 MPa，当切口到下行线正下方时，最大隆起减小至2.0 mm；③ 当切口离开下行线轴线，隆起开始增大，通过中线后不远，隆起达3.2 mm，此时盾尾已过下行线，结合注浆压力和注浆量(0.62 MPa和2.5 m^3/环)，注浆参数较大，导致了隆起增大.

Ⅱ线下行线变形情况与Ⅰ线下行线基本一致，区别在于盾构过Ⅱ线下行线范围前，下行线变形为沉降，且Ⅱ线下行线隆起收敛状况良好. Ⅲ线下行线变形相对简单，通过中线后，沉降一直减小，最终稳定在3.3 mm左右.

3.2 上行线变形分析

盾构推进时上行线变形随切口与上下行线中线的距离变化曲线如图8所示. 和下行线变形情况类似，盾构引起Ⅰ线和Ⅱ线上行线变形主要为隆起，而Ⅲ线上行线变形则主要为沉降. 穿前，Ⅰ线上行线隆起变形稍大于Ⅱ线上行线；穿后，Ⅱ线上行线隆起稍大于Ⅰ线上行线，隆起得到改善原因是穿Ⅰ线上行线时调整施工参数，变形得到了较好地控制.

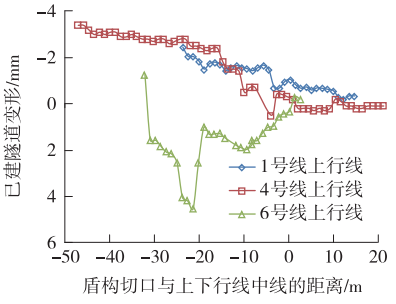


图8 上行线变形随推进距离变化曲线

Fig. 8 Up-line deformation curves with distance

下穿过程中，Ⅰ线上行线大部分测点也发生隆起，最大隆起点为盾构与Ⅰ线下行线正交点，极少数远离盾构测点发生了沉降，Ⅰ线下行线最大隆起为2.434 mm，最大沉降为0.159 mm. 由图8可知Ⅰ线上行线变形特点：① 当切口到达下行线前，上行线最大隆起相对较小，至下行线范围，上行线最大隆起开始增大，当切口通过下行线范围后，上行线最大隆起约为1.8 mm，并保持增大趋势；② 上行线最大隆起和参数变化关系不明显，但盾尾至下行线时，上下行最大隆起有一个峰值，即土仓压力和盾构注浆对已建隧道有较大影响. 切口至中线前，Ⅱ线上行线变形为沉降，且沉降在0.4 mm内. 通过中线一段距离后开始减小，接近上行线轴线不远，上行线变形开始增大，且保持增大趋势. Ⅲ线上行线变形相对简单，过中线后，沉降增大，最大达4.5 mm左右，当切口远离中线21 m左右，沉降减小，后期甚至出现隆起.

4 结 论

以Ⅰ线为主，辅以Ⅱ线、Ⅲ线，探讨了下穿全过程盾构参数，分析了已建隧道变形规律，结论如下：

① 土仓压力、同步注浆压力及注浆量是盾构下穿时已建隧道变形重要影响因素，也是下穿控制参数. 已建隧道变形对推力和推进速度敏感性较差. 当切口或盾尾至已经隧道正下方时，为控制变形和保证安全，应由实时监测，调整土仓压力、同步注浆压力及注浆量；

② 对比下穿3组隧道时施工参数变化和变形监测可知，根据实时监测及时调整参数，有利于控制已建隧道变形；

③ Ⅰ、Ⅱ线变形满足规范要求，下穿时变形主要为隆起，且随推进增大；由于孔隙水压力消散和土体固结，下穿完成后隆起减小；

④ 根据监测反馈，土仓压力建议为静止土压力的1.5～1.8倍，且小于主动土压力；同步注浆压力应控制在地层土压力范围内，注浆量应为盾尾间隙的1.4～1.8倍；

⑤ 推进速度对已建隧道变形影响很小，但为了减小土体扰动和已建隧道长期沉降，下穿时，推进仍需均匀低速.

参考文献：

[1] 张琼芳，林存刚，丁智，等. 盾构近距离下穿引起已建地铁隧道纵向变形理论研究[J]. 岩土力学，2015，36(增刊1)：568－572.
Zhang Qiongfang, Lin Cungang, Ding Zhi, et al. Theoretical analysis of vertical deformation of existing metro tunnel induced by shield tunneling under-passing in a short distance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(suppl 1): 568－572. (in Chinese)

[2] 张海彦，何平，秦东平，等. 新建盾构隧道垂直下穿对既有隧道的影响[J]. 中国铁道科学，2013，34(2)：66－70.
Zhang Haiyan, He Ping, Qin Dongping, et al. Influence

on existing tunnel crossed vertically by new shield tunnel [J]. China Railway Science, 2013,34(2):66 - 70. (in Chinese)

[3] 朱蕾,赵敬妍.盾构近距离下穿对上覆已建隧道影响的实测研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(3):656 - 661.
Zhu Lei, Zhao Jingyan. Monitoring data analysis of shield-driven construction undercrossing the existing tunnel in a short distance [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 656 - 661. (in Chinese)

[4] 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 Chuan, Su Zongxian, Zeng Dongyang. Influence of metro shield tunnelling on existing tunnel directly above [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3): 91 - 98. (in Chinese)

[5] 孙玉永,周顺华,向科,等.近距离下穿既有隧道的盾构施工参数研究[J].中国铁道科学,2010,31(1):54 - 58.
Sun Yuyong, Zhou Shunhua, Xiang Ke, et al. Study on the construction parameters of shield tunnelling in short-distance undercrossing the existing tunnel [J]. China Railway Science, 2010,31(1):54 - 58. (in Chinese)

(责任编辑:刘雨)