

软土地区盾构隧道近距离下穿地铁隧道群施工影响分析研究

王晓男, 张昌桔, 杨守臻

(杭州市市政工程集团有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要:以杭州大毛坞~仁和大道供水管道工程为背景,采用数值计算与现场监测相结合的方式,分析研究了软土地区盾构近距离下穿施工对现状地铁隧道群的影响,研究成果可为类似工程提供重要的借鉴意义。

关键词:盾构隧道;数值模拟;既有地铁;监控量测

中图分类号: TU745

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)01-0079-05

作者简介:王晓男(1990-),男,河北邯郸人,硕士,主要从事隧道与地下工程设计工作。E-mail: 1468682689@qq.com。

Research on impact of crossing construction of shield tunnel under subway tunnel group at close range in soft soil region

WANG Xiao-nan, ZHANG Chang-ju, YANG Shou-zhen

(Hangzhou Municipal Engineering Group Co., Ltd.)

Abstract: This research takes the shield tunnel for water supply from Damaowu to Renhe avenue in Hangzhou as the research background. Combining numerical calculation with field monitoring, we analyse the influence on subway tunnel group while a shield tunnel crossing under it at a close distance in soft soil region. The research results can provide important reference for similar projects.

Key words: shield tunnel; numerical simulation; existing subway; monitoring measurement

0 引言

近年来,轨道交通在全国各大城市迅速、大规模地发展,城市地铁线路越来越密集。对于后期地下空间的利用,势必造成其他管线与地铁区间隧道的相交;已建隧道作为城市交通的生命线,其安全运营格外重要。2000年白延辉等^[1]初步总结和探讨了上海地铁2号线近距离穿越1号线的施工保护技术。2007年黄俊等^[2-3]以深圳的地铁1一期工程浅埋暗挖法施工重叠隧道为背景,结合施工中的实验,监测数据,对地层以及隧道结构变形进行了分析。新建隧道盾构下穿既有隧道,应确保既有隧道结构受力及变形安全,且不中断既有轨道交通正常运营。近年来,杭州地铁大规模的修建,在建地铁难以避免与既有地铁交叉,如:杭州地铁4号线盾构隧道下穿地铁1号线区间隧道,最小净距为2.1 m,且地铁1号线为既有地

铁隧道;杭州地铁2号线下穿1号线,2号线中~凤区间上行线隧道管片顶与1号线上行线隧道管片底净距2.47 m,与1号线下行线隧道管片底净距2.68 m;2号线中~凤区间下行线隧道管片顶与1号线上行线隧道管片底净距2.39 m,与1号线下行线隧道管片底净距2.58 m。在软土地区,对盾构隧道连续穿越临近多条地铁线路的研究较少,因此,本文以大毛坞供水管道工程穿越地铁5号区间隧道(出入段线、左线、右线)为背景,通过有限差分软件FLAC3D模拟供水隧道施工,对既有隧道结构变形规律进行分析,并通过监测结果进行复核,进而为类似工程提供依据。

1 工程概况

供水盾构隧道在G3~G4井区间与地铁5号

线区间隧道相交，相交位置位于现状余杭塘路以北约 7 m，供水隧道从北向南依次穿越五常车辆基地东出入段线、左线和右线。穿越点地铁右线盾构中心标高-18.407 m，左线盾构中心标高-18.450 m，地铁出入段线盾构中心标高-10.728 m，地面标高约 3.8 m，东出入段线盾构隧道与左线盾构隧道水平距离约 12.9 m，左线盾构隧道与右线盾构隧道水平距离约 17 m。供水管道从地铁 5 号线下方穿越，相交段净距约为 3.0 m。供水隧道与地铁 5 号线区间隧道位置关系如图 1、图 2 所示。

本区间段工程所处土层地质条件如下：①粉质粘土、④₁粉质粘土、⑤₁粉质粘土、⑥₁粉质粘土、⑥_{3.3}粉质粘土、⑦₁粉质粘土、⑦_{2.1}粉含泥粉细砂、砾砂、⑦_{2.2}含泥圆砾、卵石；⑦_{2.2}为高承压含水圆砾层。供水盾构隧道施工区域位于⑥_{3.3}粉质黏土、⑦₁粉质黏土；地铁 5 号线（左线、右线和出入段线）位于⑥₁粉质粘土中，各层土的物理力学参数详见表 1。

2 数值计算分析

2.1 计算模型及管片物理参数

供水盾构隧道与地铁 5 号线区间隧道简化为垂直叠交状态，本计算模型均采用正六面体实体单元去模拟围岩和盾构管片、注浆加固圈。围岩被看作弹塑性模型材料，盾构管片、注浆加固圈被看作弹性材料。在模型当中没有直接建立盾构机模型，盾构机对周围土层起到一定支撑作用，因此采用一定厚度的加固圈进行等效处理，等支护到盾构机位置时再进行钝化处理。

盾构隧道在围岩当中应被认为被无限介质所环绕，所以在数值模拟当中为了减少边界的约束效应，左边界的计算范围取距离左线隧道中心线的 3~5 倍的洞径，右边边界计算范围取距离右线隧

道中心线的 3~5 倍的洞径，底边界计算范围取距隧道底部的距离为隧道高度的 3~5 倍进行考虑。供水隧道与地铁 5 号线净距为 3 m 时，供水隧道的埋深为 28.3 m，整个计算模型的尺寸为 50.4 m×76.8 m×53.5 m。计算模型网格见图 3。

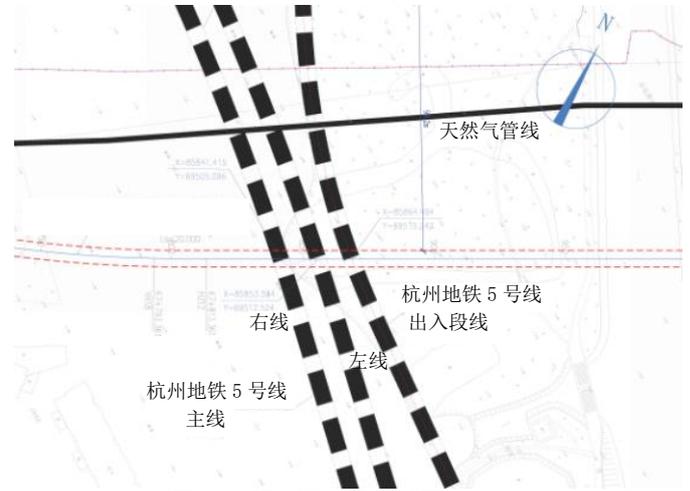


图 1 工程平面位置关系图
Figure 1 Layout plan of the project

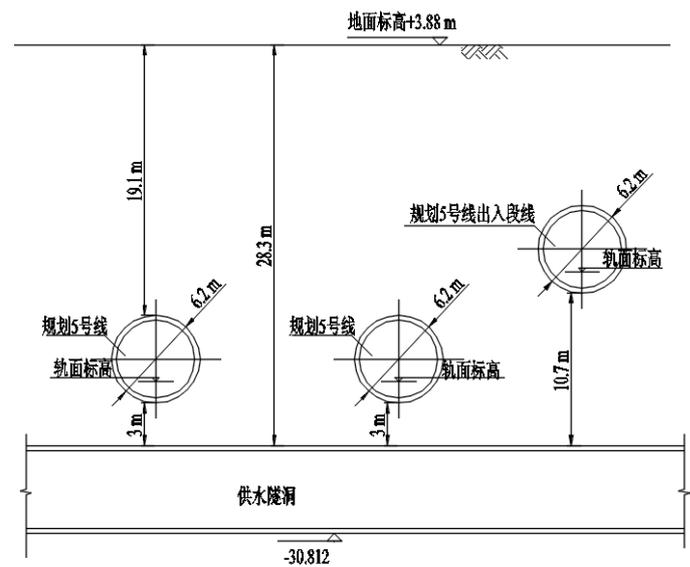


图 2 工程立面位置关系图
Figure 2 Diagram of elevation positional relationship of the project

表 1 土的力学性质指标

Table 1 Mechanical properties of soil

地层参数	弹模/(E MPa ⁻¹)	泊松比 μ	内摩擦角 φ/°	粘聚力 c/kPa	重度 γ/(kN m ⁻³)
①粉质粘土	15.24	0.3	11.95	14.95	18.6
④ ₁ 粉质粘土	21.81	0.3	13.6	33.4	19.7
⑤ ₁ 粉质粘土	22.44	0.3	18.8	14.8	19.3
⑥ ₁ 粉质粘土	22.26	0.3	16.3	24.4	19.9
⑥ _{3.3} 粉质粘土	16.62	0.3	14.0	19.1	19.6
⑦ ₁ 粉质粘土	21.3	0.3	29.3	13.3	20.3
⑦ _{2.1} 含泥粉细砂、砾砂	34.71	0.3	29.3	13.3	20.3
⑦ _{2.2} 含泥圆砾、卵石	-	-	-	-	-

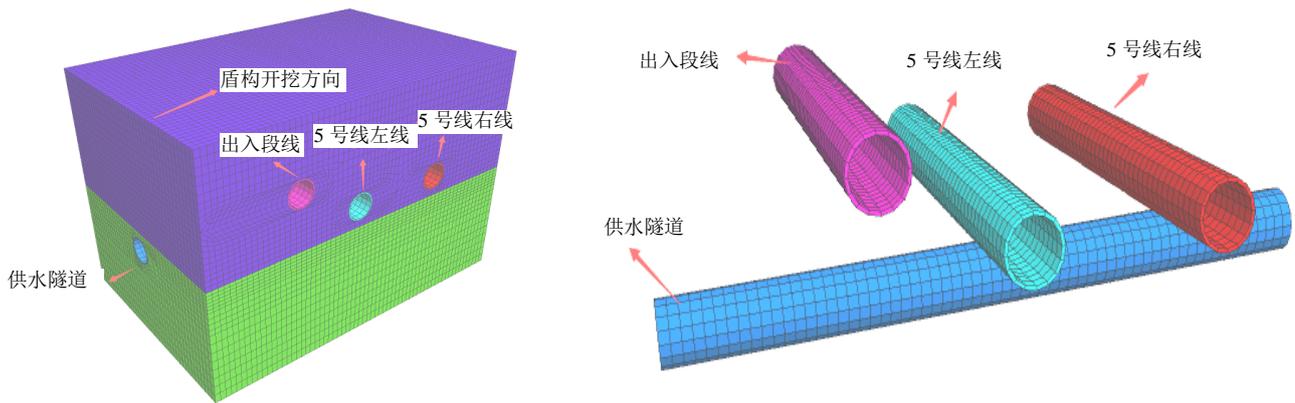


图 3 计算模型

Figure 3 Numerical model

结构的力学性质指标如表 2 所示:

表 2 结构的力学性质指标

Table 2 Mechanical properties of structure

结构参数	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	重度 γ $/(\text{kN m}^{-3})$
管片	38000	0.2	25

2.2 计算过程及监测点布置

盾构近距离下穿既有隧道施工模拟是一个连续复杂的过程,盾构施工顺序主要分为三个过程,即土体的开挖、掌子面的支护、管片拼装。这三个过程主要如下:

(1)土体的开挖:盾构开挖用空组进行模拟;

(2)掌子面的支护:盾构土压平衡采用在掌子面施加面力进行模拟;

(3)管片拼装:管片采用实体单元进行模拟。

为反应供水隧道施工对地铁线路的影响规律,在地铁 5 号左线、右线和出入段线隧道断面布置三个监测点,监测点的位置如图 4 所示:

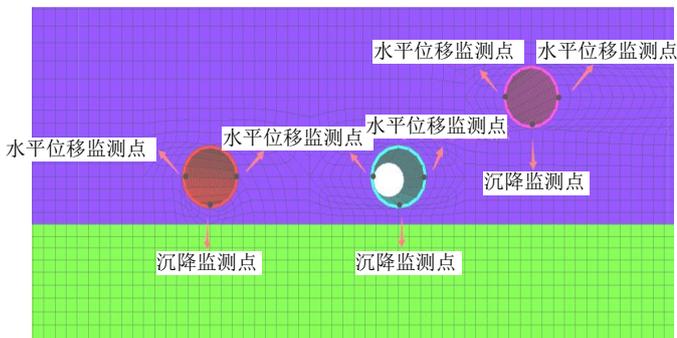


图 4 监测点断面布置图

Figure 4 Section layout diagram of monitoring points

2.3 施工计算结果分析

供水盾构隧道从北向南依次穿越地铁出入段线、地铁 5 号线左线和右线。随着供水盾构隧道

逐环开挖,地铁 5 号线区间隧道拱底竖向位移曲线如图 5 所示,地铁 5 号线区间隧道隧道拱腰水平收敛曲线如图 6 所示。

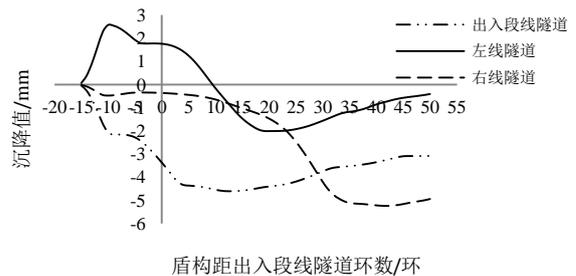


图 5 地铁 5 号线区间隧道拱底竖向位移曲线

Figure 5 Vertical displacement curve of bottom of shield tunnel of metro line 5

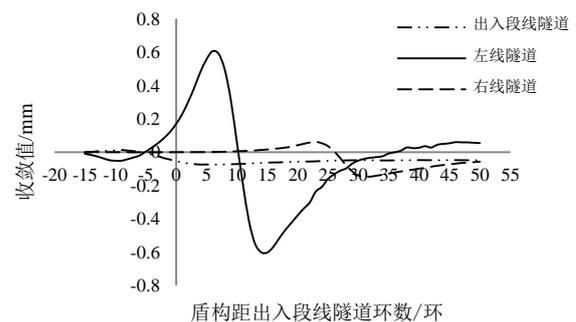


图 6 地铁 5 号线区间隧道水平收敛曲线

Figure 6 Horizontal displacement curve of bottom of shield tunnel of metro line 5

从图 5~6 可知,供水盾构隧道从北向南依次下穿出入段线隧道,地铁 5 号线隧道(左线和右线),三条隧道结构拱底沉降变化曲线规律有所差别,出入段线隧道结构拱底竖向位移随着供水盾构隧道向地铁 5 号线右线隧道方向推进,沉降值

逐渐加大，达到最大值后逐渐减小，最后沉降趋于稳定；地铁5号线左线隧道结构拱底竖向位移先隆起后沉降，最后沉降趋于稳定；地铁5号线右线隧道结构拱底竖向位移逐渐加大，达到最大值后逐渐减小，最后沉降趋于稳定。

随着供水盾构隧道的掘进，出入段线隧道与地铁5号线隧道（左线和右线）水平收敛位移规律一致，即隧道收敛位移先增大，后减小，最终趋于稳定。其中地铁5号线左线收敛变形受下穿盾构隧道施工影响较大，最大收敛值为0.6 mm。

3 现场监测分析

在供水盾构隧道下穿施工地铁5号线及出入段线隧道时，为了确保既有隧道结构安全，在既有隧道里布置监测点。用监测数据指导盾构施工，使供水盾构隧道平稳通过既有隧道段。

3.1 监测点布置

本次既有地铁隧道监测范围为100.8 m（84环），以供水隧道轴线与既有隧道轴线交叉点为监测断面中点，向东西各布置9个监测断面，每个监测断面布置四个监测点，即2个轨道监测点和2个拱腰水平监测点。监测点平面布置图如图7所示，监测点断面布置图如图8所示。

3.2 监测结果分析

供水盾构隧道掘进施工到距出入段线隧道结构边线23环时，开始实时监测。实测地铁5号线区间隧道轨道竖向位移曲线如图9所示，实测地铁5号线区间隧道拱腰水平收敛曲线如图7所示。

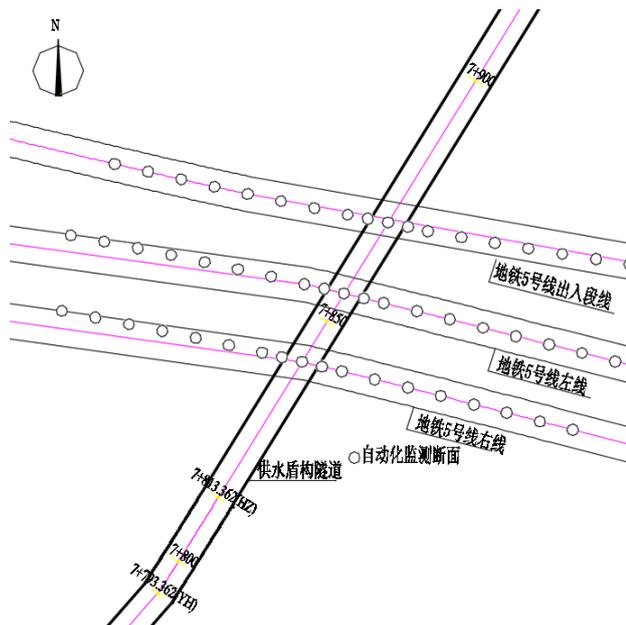


图7 监测点平面布置图
Figure 7 Layout plane of monitoring points

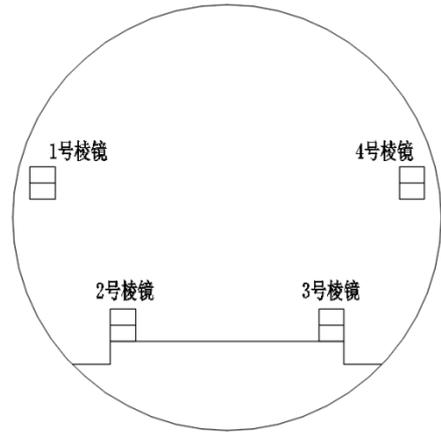


图8 监测点断面布置图
Figure 8 Section layout diagram of monitoring points

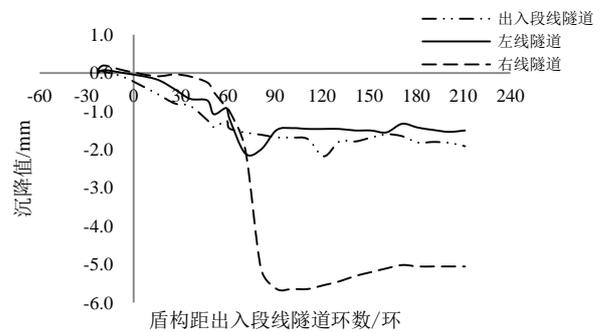


图9 实测地铁5号线区间隧道轨道竖向位移曲线
Figure 9 The measured vertical displacement curve of bottom of shield tunnel of metro line 5

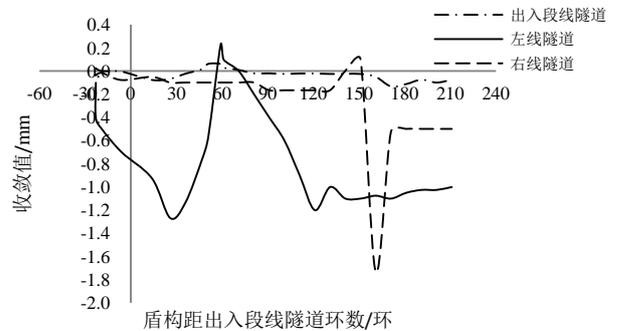


图10 实测地铁5号线区间隧道水平收敛曲线
Figure 10 The measured horizontal displacement curve of bottom of shield tunnel of metro line 5

现场监测开始于2019年3月5日，结束于2019年4月8日，各项监测数据趋于稳定。供水盾构隧道从北向南依次下穿出入段线隧道，地铁5号线隧道（左线和右线），三条隧道轨道实际监测沉降变化曲线规律基本相同，随着供水盾构隧道向地铁5号线右线隧道方向掘进，三条既有地铁隧道轨道沉降似先呈增大，沉降最大值出现在推过既有隧道后，最后沉降值减小趋于稳定。模拟既有隧道结构沉降规律与实测既有隧道轨道沉

降监测规律大致相同,即沉降先增大后减小最后趋于稳定。出入段线隧道、地铁5号线左线隧道、右线隧道实际监测轨道沉降最大值分别为:-2.2 mm、-2.1 mm、-5.6 mm;三条既有隧道拱底数值模拟沉降最大值分别为:-4.6 mm、-2.0 mm、-5.25 mm,相应分别增加分别为:2.4 mm、-0.1 mm、-0.35 mm(负号为减少)。

随着供水盾构隧道的掘进,地铁5号线隧道(左线和右线),三条隧道轨道实际监测收敛变化曲线规律基本相同,随着供水盾构隧道向地铁5号线右线隧道方向掘进,三条既有地铁隧道收敛先呈减小,后增大,再减小,最后增大趋于稳定。模拟既有隧道结构收敛规律与实测既有隧道轨道收敛监测规律大致相同,即沉降先减小后增大再减小最后增大趋于稳定。出入段线隧道、地铁5号线左线隧道、右线隧道实际监测轨道沉降最大值分别为:-0.1 mm、-1.2 mm、-1.7 mm;三条既有隧道拱底数值模拟沉降最大值分别为:-0.07 mm、-0.60 mm、-0.15 mm,相应分别增加分别为:-0.03 mm、-0.6 mm、-1.55 mm(负号为减少)。

由图5~6,图9~10可知,实际监测数据与数值模拟数据存在差异,原因在于数值模拟未考虑工后沉降的影响;近距离下穿多条临近既有隧道,既有隧道结构受相互影响较大,对最后下穿的既有隧道影响最大。隧道结构沉降主要受盾构机前舱压力与盾构机自身重力影响,土体的开挖,供水管道管片自重难以平衡卸载土体重量,改变了原来的应力状态,应力再平衡导致沉降的产生;沉降值减小趋于平衡是由于盾构推进过程一起土体卸载回弹,以及同步注浆压力的影响。

4 结 论

(1)供水盾构隧道下穿多条临近既有隧道施工时,采用三维数值模拟计算可以分析盾构隧道施工对既有隧道结构的影响;可为隧道的选线和既有隧道的保护提供理论依据。

(2)盾构下穿临近多条既有隧道施工时,既有隧道结构变形规律相似,既有隧道结构变形受其位置相互影响。

(3)在软土地区,对于覆土较深盾构下穿既有隧道,隧道结构变形以沉降为主;既有隧道结构变形规律比较明确,能够为相似工程提供依据。

(4)为减少既有地铁隧道的隆起和沉降,在盾构推进过程中要选择合适的土仓压力;严格控制注浆压力、注浆量、注浆时间、注浆管的退出速率、浆液配合比和浆液稠度,力求对上方隧道的影响最小;二次注浆采用双液注浆,做到低压力、多次、适量、适时,可控制已建隧道的变形速率。

参考文献:

- [1] 白延辉, 尤旭东, 李文勇. 盾构超近距离穿越地铁运营隧道的保护技术[J]. 地下空间, 2000, 3: 2-6.
- [2] 黄俊, 张顶立. 地铁重叠隧道上覆地层变形的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2176-2182.
- [3] 黄俊, 张顶立, 徐桂珍. 重叠隧道上覆地层变形规律分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2634-2638.
- [4] 宁寅, 冯伟, 马水其, 等. 泥水盾构下穿已有隧道施工过程数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5): 63-69.