

大坡度并小半径曲线盾构连续穿越建筑群 沉降施工控制

吴涛

(中铁十八局集团第四工程有限公司,天津 300222)

摘要:以天津地铁三号线水上北路站—吴家窑站盾构区间左线施工为背景,针对盾构施工区间遇到的大坡度并小半径曲线且连续穿越建(构)筑群盾构施工的综合难题,利用施工过程中积累的各种数据,采用归纳总结分析和数理统计的方法,分析了地面建筑物沉降与地质、推力、注浆、纠偏等参数的关系,得出了影响建筑物沉降的因素主要为曲线和纠偏时的超挖、推进速度、注浆参数及注浆方法,总结了控制地面建筑物沉降的管理与技术措施。

关键词:地铁隧道;盾构;小半径;大坡度;建筑物;沉降

中图分类号:U455.43 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)11-0076-05

Control on the Settlement Caused by Continuous Crossing under Building Group with Large Slope and Small Radius Curve Shield/WU Tao (China Railway Eighteenth Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Take the left line of a shield interval construction in Tianjin metro Line 3 as the example, according to the comprehensive problem of large slope and small radius curve shield construction with continuous crossing building and structure group, based on a variety of data accumulated in the process of construction, the analysis is made on the relationship with ground subsidence and geological, thrust, grouting and deflection correction parameters by summary and mathematical statistics methods. The main factors affecting building settlement are obtained to be the curve and the over excavation, shield tunneling speed, grouting parameters and grouting method; the management and technical measures of control on building settlement are summed up.

Key words: subway tunnel; shield; small radius; large slope; buildings; settlement

城市的发展,带动了轨道交通建设的发展,在轨道交通线路的选择上,由于受规划及建、构筑物的制约,使得轨道交通的线形越来越复杂。小半径曲线和大坡度隧道线形虽不属良好,但在应用上将会越来越多。下面就以天津地铁三号线水上北路站—吴家窑站盾构区间的30‰的坡度和305 m半径转弯为例,分析了大坡度推进和小半径转弯段控制建筑物沉降的技术措施。

m的曲线和30‰下坡向30‰上坡过渡段以及30‰的上坡上,且上层有气象里、平山里等4幢建筑物,其中建筑物间距最大34.620 m,最小13.636 m,建筑物为20世纪70年代修盖,多为连体楼,以条形、筏片基础为主,对沉降比较敏感。建筑物信息详见表1。该地段为河床~河漫滩人工填土层,地质为易液化淤泥质粉质粘土层、粉质粘土层、粉砂层,

表1 盾构穿越建筑物信息表

建筑物名称	主体结构形式	基础结构形式	穿越里程/环	隧道埋深/m	穿越类型
建国楼38号	混6	片筏基础、埋深4.2 m	222~235	17.6	旁穿
建国楼40号	混6	片筏基础、埋深4.2 m	238~266	18.2	旁穿
平山里18/24号	混6	片筏基础、埋深4.5 m	323~389	20.4	穿角
气象里20/22号	混6	350×350方桩、桩长18 m	398~442	20.5	斜穿
气象里23/26号	混6	片筏基础、埋深4.0 m	485~521	17.8	斜穿
气象里28/30号	混6	片筏基础、埋深4.0 m	538~602	16.0	斜穿
德才里14/18号	混4	片筏基础、埋深2.5 m	676~700	11.0	旁穿

1 工程概况

天津地铁三号线水上北路站—吴家窑站盾构区间左线线路平面呈双S形,全长878.827 m,最小曲线半径为305 m,最大曲线半径为1000 m;隧道纵断面呈V形,最小坡度为2‰,最大坡度为30‰,隧道覆土深度9~22 m。沿线主要穿越天塔湖、卫津河和气象里、平山里、德才里等7幢建(构)筑物。从DK9+060.321~533.177,盾构隧道处于半径为305

收稿日期:2013-08-05;修回日期:2013-10-10

作者简介:吴涛(1982-),男(汉族),湖北人,中铁十八局集团第四工程有限公司南京地铁项目部总工程师,土木工程专业,天津市津南区双港镇鑫港园22号1门601号,191002355@qq.com。

可塑性较差^[1]。

左线的施工重点和难点是:(1)盾构在小半径、大坡度下连续穿越建筑物群;(2)305 m小半径转弯和30‰下坡向30‰上坡过渡段同时出现;(3)右线掘进面与左线掘进面相距100 m,在左线施工前右线施工已对土体造成较大扰动导致部分建筑物已有较大沉降;(4)所穿越建筑物基础与结构较差;(5)地质条件恶劣。

2 地面建(构)筑物沉降分析及控制措施

2.1 沉降控制分析

在大坡度并小半径曲线盾构掘进时,纠偏量较大,对土体扰动的增加易发生较大沉降量,相对直线段盾构施工,有以下几个因素影响沉降^[2]:

(1)小半径曲线掘进,盾构时刻处于纠偏状态,实际开挖面为一椭圆形,实际开挖体积超出理论开挖体积;

(2)盾构纠偏量较大,对土体的扰动也大,容易造成建筑物的后期沉降;

(3)小半径曲线掘进时将增加地层损失,地层损失达 $(0.5\% \sim 1\%)8L^2\pi R/(R+R_c)$ (其中 L 为盾构长度, R 为盾构外半径; R_c 为盾构掘进曲线半径);

(4)大坡度并小半径曲线推进时地层跨度较大。

盾构施工会不可避免的引起地层沉降,地面沉降槽的体积等于隧道施工中发生的地层损失的体积,地面沉降曲线如图1所示。

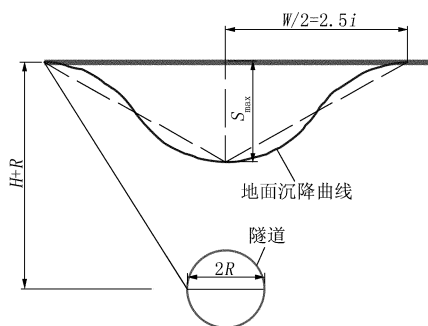


图1 地面沉降曲线图

盾构施工中,沿线沉降槽宽度及沉降槽最大沉降量理论计算公式如下:

$$W = \frac{2(H+R)}{\operatorname{tg}(45^\circ - \varphi/2)}$$

$$S_{\max} = 2V_1/W$$

式中: W ——沉降槽宽度; S_{\max} ——沉降槽最大沉降量; H ——隧道覆土厚度; R ——盾构开挖半径; φ ——地层内摩擦角; V_1 ——隧道开挖地层损失量。

通过估算,并结合以往监测建筑物的经验,确定地面沉降槽宽度为40 m,在沉降槽范围内的建筑物为监测对象。

相应的解决对策为进行动态管理和信息化施工,控制好同步注浆的注浆时间及注浆量。视具体情况,必要时进行二次补浆。

2.2 沉降控制措施

地面建(构)筑物沉降控制分为2方面:盾构切口前的沉降,由土压力及掘进速度控制;盾尾后的沉降,由同步注浆及壁后注浆控制。

2.2.1 严格控制土压力及出土量

在试推段施工参数的指导下,根据穿越地层的特点进行合理优化,土压力设定要考虑隧道上部土体损失和地面建(构)筑物的附加应力的影响。对每环的实际出土量和理论出土量进行比较,严格保证开挖面的土压平衡,减少对土体的扰动,防止超挖^[3]。

2.2.1.1 推进时每环理论出土量

$$V = \pi D^2 L/4$$

式中: V ——理论出土量; D ——盾构主体最大半径; L ——推进长度。

出土量控制在理论值的95%左右保证盾构切口上方土体能微量隆起,以减小土体的后期沉降量。

设计为最小半径为305 m、最大坡度为30‰的圆滑曲线,而在实际推进过程中,推进轴线为不规则的曲折线,而且会造成曲线外侧超挖,曲线外侧土体损失严重,地面建筑物沉降发生较大变化。因此在曲线段推进过程中,必须采用同步注浆和结合二次注浆的方法加强对曲线外侧的压浆量,以填补施工空隙,同时加固曲线外侧土体,增加外侧土体给予管片的支撑力,减小成型管片的水平和垂直位移,确保盾构姿态,保证地面建筑物沉降。

2.2.1.2 土仓压力的计算

施工中正面平衡压力的计算公式:

$$P = k_0 \gamma h$$

式中: P ——平衡压力(包括地下水); γ ——土体的平均重度, kN/m^3 ; k_0 ——土的侧向静止平衡压力系数,一般取0.6~0.8; h ——隧道埋深,m。

由公式可以得出土仓压力主要是与土体的平均重度和隧道埋深有关。在淤泥质粉质粘土层且连续穿越建筑物这种地层中,此时的土仓压力要比盾构在别的地层中穿越时复杂;由于土体的流塑性大,土仓不仅受到正上方的压力,并且由于土体流动侧方及下方土体的压力也增大了许多,地面建筑物的自

重又增大了正上方的压力,隧道为深埋隧道,造成施工中土仓压力比正常段施工时增大许多,较大的土仓压力又会减低盾构掘进速度。

因此,确定土压力范围为 0.30 ± 0.05 MPa。在穿越建(构)筑物过程中,根据实时的地面及建(构)筑物变化监测数据对预设土压力值进行调整、优化。

2.2.2 同步注浆与壁后压浆

2.2.2.1 注浆量

盾构每推进一环的建筑空隙为^[4]:

$$V = (D^2 - d^2)L/4$$

式中: V ——建筑空隙; D ——盾构外径; d ——管片外径; L ——推进长度。

理论上讲,浆液只须 100% 充填建筑总空隙即可,但尚须考虑下述因素:(1)浆体的失水收缩固结,有效注入量小于实际注入量;(2)部分浆液会劈裂到周围地层中;(3)曲线推进、纠偏或盾构抬(叩)头,实际开挖断面成椭圆;(4)操作不慎,盾构走蛇形;(5)盾构推进时,壳体外周带土,使开挖断面大于盾构外径。因此,合适的注浆量应比理论注浆量要大。根据施工数据统计,在正常段每环的注浆量为建筑空隙的 150% ~ 200%;通过建筑物时,每环的注浆量为建筑空隙的 250%;通过淤泥质粉质粘土层时,每环的注浆量为建筑空隙的 320%。同步注浆浆液的配比,在原有浆液中加入适量的水泥,以提高浆液的后期强度,稠度控制在 9 ~ 11,且保证不会堵塞注浆管。加入速凝剂,浆液的初凝时间缩短,减小了施工时的初期沉降。根据施工中的实际情况及变形监测情况,随时调整注浆参数,从而有效控制轴线。

2.2.2.2 注浆压力

在理论上只需要使浆液入口的压力大于或等于该处水土压力之和,即可保证开挖导致的空隙填充密实度。但是如果压浆压力过大,带压浆液的劈裂性会使周围土层产生裂隙,盾体周围的土层将会被浆液扰动而造成较大的后期变形从而导致地面沉降。区间试掘进段,盾构曾按 $1.27\gamma_0 h$ (其中 γ_0 为土

容重, h 为隧道上覆土厚度)确定注浆压力,以此摸索最佳参数。但实际情况与该理论计算有较大差距,根据分析,有以下 2 点原因:第一是注浆压力在浆液管道中产生的压力损失,第二是实际注浆量大于理论注浆量。

2.2.2.3 壁后二次注浆

当盾构穿越地面建(构)筑物或管线时,可根据地质条件和沉降监测数据进行壁后二次补压浆。浆液可采用单液浆和双液浆,注浆之前进行配比的调试,要求浆液速凝,强度高。在同步注浆后,可以更进一步加强土体与管片之间的稳定程度和开挖导致的空隙填充密实度。壁后注浆压力一般控制在 0.3 ~ 0.5 MPa,过大可能会引起地表隆起、管片错台,注浆量视地表沉降隆起数据而定,原则为少量多次。

2.2.2.4 同步注浆及二次注浆技巧^[5]

在淤泥质粉质粘土层中大坡度急转弯掘进时,确保注浆质量,合理调整浆液量、浆液稠度、注浆压力和注浆方法,必要时增加快凝剂和膨胀剂,可以尽早地固定管片,改善管片的受力状态,防止推力产生各种侧向负面的分力。盾构于大坡度和转弯时主要注浆方式如图 2 所示^[1]。

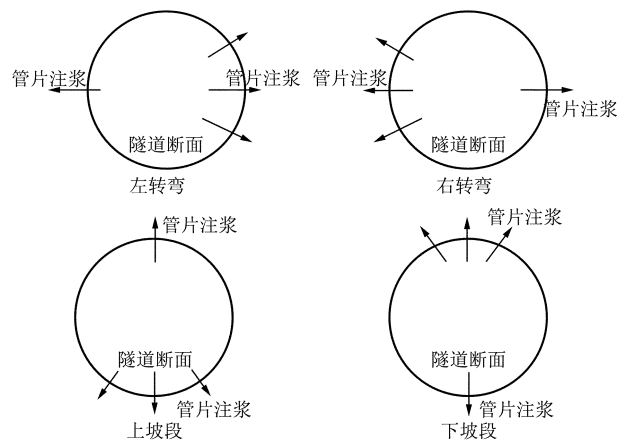


图 2 隧道在大坡度和转弯时注浆方式

2.2.3 推进速度

盾构小半径并大坡度段穿越建筑群的范围为 300 ~ 600 环,从图 3、表 2 可以看出,盾构推进速度

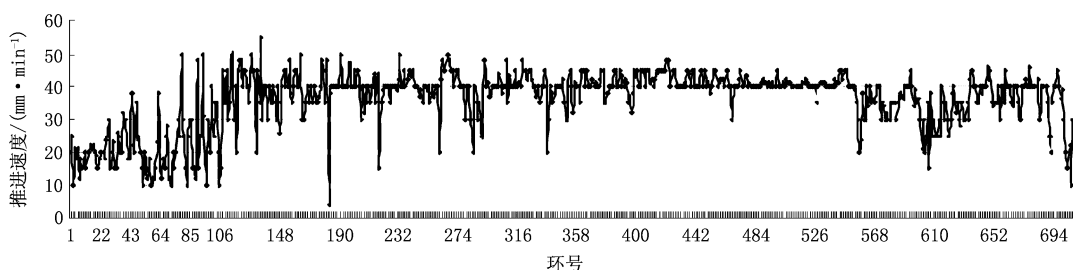


图 3 推进速度变化曲线图

表2 建筑物沉降监测数据

楼号	监测点号和累计沉降数据/mm				
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
建国楼 38 号	-2.15	-3.25	-1.50	-2.25	-4.10
建国楼 40 号	-3.05	-4.10	-2.75	-4.55	-5.15
平山里 18/24 号	-3.45	-3.75	-2.80	-4.70	-3.90
气象里 20/22 号	-6.55	-7.75	-7.00	-6.85	-7.20
气象里 23/26 号	-7.70	-8.10	-7.20	-7.90	-8.00
气象里 28/30 号	-9.25	-9.60	-8.70	-7.95	-9.25
德才里 14/18 号	-6.30	-5.50	-6.35	-5.85	-7.15

均保持在 40 ~ 50 mm/min 之间,同时该段所有的建筑物沉降最大处为气象里 28/30 号 1-2 号点,累计沉降为 -9.60 mm,在这种淤泥质地质下建筑物沉降均控制在规范以内,效果良好。因此,在保证同步注浆能满足完全填充盾构推进过后产生空隙的情况下,穿越建筑物段盾构推进速度可适当加快,同时合理减小刀盘转速,可以减小刀盘旋转对土层的二次扰动,二次注浆跟进,可以合理的控制建筑物的沉降。

2.2.4 其他措施

(1) 严格控制好姿态,争取掘进时的细微纠偏,避免大的纠偏而造成对土体的扰动。盾构掘进的纠偏量越小,则对土体的扰动越小^[6]。

(2) 减小推力和掘进速度,同时选择合适的土仓压力保持模式,最大限度地减小地层扰动,和保证掌子面的稳定,防止坍塌。

2.2.5 粘土层控制沉降措施

在地质为河床~河漫滩人工填土层,地层为淤泥质粉质粘土层这样的地段穿越建筑物掘进时,要保证盾构匀速推进,尽量保证盾构不停机。但是在施工过程中出现了通过增大土仓压力,保证同步注浆和壁后补压浆的措施致使地面隆起达 5 mm 时,建筑物由于受地下土体扰动太大,继续下沉的情况,最大单次沉降达 -0.8 mm,一天累计沉降为 -1.8 mm。在这样的条件下,加强同步注浆和壁后补压浆只能起到缓解建筑物沉降的效果,使之单次沉降控制在 -0.3 mm,一天累计沉降控制在 -0.8 mm,但不能彻底控制沉降。所以通过这种地段时,必须加快掘进速度,尽量减少掘进时对土体的扰动,同时继续进行壁后补压浆,这样可以使建筑物沉降减到最小。

通过观察监测数据发现,建筑物沉降最大发生在下面几处:(1) 盾头到达建筑物下方,占总沉降的 20%;(2) 建筑物脱离盾尾(同步注浆影响的范围),直到第一借台车(二次注浆影响的范围),大约 8 环的距离,占总沉降的 60%;(3) 后期沉降占总沉降的

10%。

在粘土层增大推力和土仓压力是可以减少建筑物的沉降,但是不易过大,否则会因压力过大产生高温,由于高温、高压和水会在刀盘和土仓内结成泥饼,造成刀盘开口堵塞,掘进困难。

3 实际穿越的建筑物实例

3.1 建国楼 38/40 号楼

为三联体楼,20 世纪 70 年代建造,为旁穿。

难点:一侧沉降过大导致建筑物可能从中间产生裂缝。

采取措施:(1) 保证机械设备运转良好;(2) 匀速推进,控制好盾构姿态;(3) 根据监测报表数据,提高土压至 0.30 MPa;(4) 对有建筑物一侧隧道进行壁后补浆。

最后效果:累计沉降为 -3.2 mm。

3.2 平山里 18/24 号楼

20 世纪 70 年代建造,为正穿,条形基础。

难点:(1) 处于 -30%下坡向 30%上坡过渡与 305 m 小半径曲线正上方,姿态纠偏时会产生超挖;(2) 穿越段比较长,为 15 m;(3) 由于建筑物基础地质为淤泥质粉质粘土层,掘进时造成建筑物持续沉降,采用的办法是加强同步注浆,同时启动二次双液浆,用以控制沉降。但是这样做,会导致浆液顺流,从盾尾流向刀盘,把整个盾体抱死,造成推进困难,最后推力达到 24000 kN 时才可以以极低的速度掘进;(4) 右线旁穿时已对建筑物造成沉降累计达 -6.2 mm。

采取措施:(1) 掘进时分别在设计竖曲线上方、设计平曲线内侧(靠圆心侧)设计出一条纠偏曲线,形成反向预偏移,用于指导施工;(2) 匀速推进,控制好盾构姿态,避免产生蛇形轨迹;(3) 根据监测报表数据,提高土压至 0.35 MPa;(4) 将同步注浆压力提升至 0.5 MPa,浆液稠度为 10,加入速凝剂;(5) 增大二次双液注浆量。

最后效果:最大累计沉降为 -3.6 mm。

3.3 气象里 20/22 号楼

20 世纪 70 年代建造,为正穿,条形基础。

难点:(1) 处于 30%上坡段与 305 m 小半径曲线正上方,姿态纠偏时会产生超挖;(2) 右线也为正穿,已对建筑物造成沉降累计达 -8.6 mm,对土体造成扰动较大;(3) 地质为淤泥质粉质粘土层,有沙层,流塑性强。

采取措施:(1) 保证机械设备运转良好;(2) 根

据监测报表数据,减小土压至 0.32 MPa,防止对土体造成更大扰动;(3)将同步注浆压力提升至 0.5 MPa,浆液稠度为 9,加入速凝剂;(4)增大二次双液注浆量,合理调整浆液配合比,缩短初凝时间。

最后效果:最大累计沉降为 -11.6 mm。

3.4 气象里 23/26、28/30 号楼

为联体楼,20 世纪 70 年代建造,为正穿,条形基础。

难点:(1)处于 30%上坡段与 305 m 小半径曲线正上方,姿态纠偏时会产生超挖;(2)右线为穿角,已对建筑物造成沉降累计达 -13.6 mm,对土体造成扰动较大;(3)地质为淤泥质粉质粘土层,有流沙,流塑性强,可塑性差,造成建筑物持续沉降。

采取措施:(1)保证机械设备运转良好;(2)根据监测报表数据,减小土压至 0.30 MPa,防止对土体造成更大扰动;(3)将同步注浆压力提升至 0.5 MPa,浆液稠度为 9,加入速凝剂;(4)增大二次双液注浆量和注浆点,合理调整浆液配合比,缩短初凝时间。

最后效果:最大累计沉降为 -20.6 mm。

(上接第 60 页)

过程中,没有出现塌孔、垮孔等现象,经超声波检测,所有桩孔孔径、孔形、垂直度均满足设计要求;(2)除部分钢护筒加长外,其余钢护筒按 2.5 m 设置,起拔顺利,节约了成本;(3)成孔成桩快,满足业主施工进度要求,社会效益显著。

该工程于 2013 年 3 月 5 日开工,至 2013 年 5 月 6 日竣工,经泉州桩基检测中心抽检,其中抽心试验 30 根,静载试验 30 根,低应变测试 337 根,均满足设计要求,达到了优质标准。 $\Phi 1200$ mm 桩静载试验单桩竖向极限荷载 28000 kN,这是目前泉州地区单桩荷载最重桩,试验结果沉降 1.82 cm,表明优质泥浆应用取得良好效果。

6 结语

工程实践表明,科学合理地运用好泥浆是成孔

4 结语

通过对本次盾构施工的总结,我们得到了引起地面沉降的主要原因,利用施工过程中积累的各种数据,分析了地面建筑物沉降与地质、推力、注浆、纠偏等参数的关系,得出了影响建筑物沉降的因素主要为曲线和纠偏时的超挖、推进速度、注浆参数及注浆方法,总结了控制地面建筑物沉降的管理与技术措施。实践表明,施工参数经过科学的、合理的调整后,建筑物的沉降是完全可以得到控制的。

参考文献:

- [1] 张成龙.大坡度并小半径曲线段盾构操作与纠偏施工控制研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(9).
- [2] 高俊强,胡灿.盾构推进和地表沉降的变化关系探讨[J].南京工业大学学报(自然科学版),2005,(4).
- [3] 李围,何川,张志强.大型地下结构下修建盾构隧道模型试验[J].西南交通大学学报,2005,(4).
- [4] 董华珍,王仲林.城市轨道交通中小半径曲线问题探讨[J].四川建筑,2005,(3).
- [5] 边金,陶连金,郭军.盾构隧道开挖引起的地表沉降规律[J].地下空间与工程学报,2005,(2).
- [6] 秦建设,尤爱菊.盾构隧道开挖面稳定数值模拟研究[J].矿山压力与顶板管理,2005,(1).

质量的保证,是经济效益的根本,是施工效率的保障,针对具体地层配制合适的优质泥浆对旋挖钻机成孔能起到很好的护壁作用。此次的实践,可为以后类似工程的桩基施工提供宝贵经验。

参考文献:

- [1] 屠厚泽.钻探工程学[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,1998.
- [2] 中国建筑工程总公司.地基与基础工程施工工艺标准[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [3] 北京土木工程建筑学会.地基与基础工程施工技术措施[M].北京:经济科学出版社,2005.
- [4] 孙丙伦,陈师逊,陶士先.复杂地层深孔钻探泥浆护壁技术探讨与实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(5):13-16.
- [5] 谭现锋,朱学顺.静态泥浆护壁的湿式旋挖工法的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(12):22-23.
- [6] 时志兴,翟东旭,张东兴.小口径岩心钻探钻孔缩径的预防与处理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(6):46-49.