

# 复杂线路条件下盾构下穿民房掘进参数优化研究

李金锁

(中铁十八局集团有限公司,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线路为研究背景,以盾构施工控制技术为研究方向,通过试验段掘进、现场数据监测分析、计算模拟分析、盾构施工参数选取、实际监测数据分析等,研究了在复杂线路条件下(变坡度,小曲线半径等),盾构机掘进的参数优化。以试验段的跟踪监测调整数据为分析依据,着力主要控制参数,对掘进参数的选取采用理论计算结合实际监测的方法,论证参数的可适用性。研究结果表明:采用合理的掘进参数,能有效控制盾构机在复杂线路条件下下穿建筑物时的沉降。

**关键词:**大坡度;小曲线半径;盾构隧道;地表沉降;掘进参数;数据监测

**中图分类号:**U455.43 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)01-0044-05

**Research on Tunneling Parameters Optimization for Shield Tunneling Down-traversing Civil Houses under Complex Line Conditions/Li Jin-suo** (China Railway 18 Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Take the left line of a shield interval construction in Tianjin metro Line 3 as the example and with the shield construction control as the research direction, based on the tunneling in test section, analysis on field data monitoring, analysis on computational simulation, selection of shield construction parameters and analysis on actual monitoring data, the paper makes the research on the parameters optimization of tunneling shield machine under complex line conditions (slope changing and small curve radius). With the track monitoring data of the test section as the analysis basis, focus on the main control parameters, the tunneling parameters are selected by theoretical calculation combined with the actual monitoring to demonstrate the parameter applicability. Research results show that the rational tunneling parameters can effectively control the shield machine sinking during the down-traversing building process in the complex line.

**Key words:** large slope; small curve radius; shield tunnel; ground settlement; tunneling parameter; data monitoring

## 0 引言

近年来,在城市修建的盾构隧道,大多采用双线盾构隧道,随着盾构机性能的提高,一般情况下能较准确的预测并控制住盾构掘进对周围环境的影响,只要严格精准控制施工参数,实时反馈,及时调控加上有效的注浆措施,就能有效控制好建筑物的沉降。而在市区修建地铁,经常会遇到在地面建筑密集、地下管线复杂的场地施工。由于盾构法施工势必引起地面沉降,使地面结构物、构筑物或地下管线受到不同程度的影响。地表沉降的基本原因是盾构掘进时,所引起的地层损失和隧道周围地层受到扰动和剪切破坏的再固结。在复杂线路条件下(变坡度,小曲线半径等),盾构机需经常纠偏和超挖,使得盾构机对周围土体的扰动和地层的损失量增加,导致地表沉降量相比简单线路条件下增大。

目前,我国城市轨道交通正处在一个高速发展时期,盾构施工正以其高技术性、高质量、高安全性

和强环保性为国内所认同和推广。复杂线路条件下(变坡度,小曲线半径等)盾构下穿民房掘进的参数研究,很大程度上减少了盾构施工受区间线型条件及沿线环境条件的限制,充分体现该施工技术的优越性。

## 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、德才里等八幢建(构)筑物。建筑物多为连体楼,以条形、筏片基础为主。

隧道地质为淤泥质粘土层、淤泥质粉质粘土层、粉土层、粉质粘土层、粉砂层,可塑性较差,地内表层地下水具有微承压性为微承压水,地下水位深 0.70

收稿日期:2013-11-11

**作者简介:**李金锁(1963-),男(汉族),河北武安人,中铁十八局集团有限公司第四工程公司常务副总经理、高级工程师,国家一级建造师、全国优秀项目经理,市政工程专业,从事大型城市轨道交通、隧道及市政工程施工技术管理与科研工作,天津市河西区柳林东中铁十八局集团有限公司,672522890@qq.com。

~1.80 m。地质参数见表 1。

表 1 地质参数表

地层编号	土层	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	厚度 H/m	孔隙比 e
③ <sub>1</sub>	粘土层	12	7.4	27.2	1.5	0.98
④ <sub>5</sub>	淤泥质粘土层	24	12.4	27.0	10.5	0.87
④ <sub>2</sub>	淤泥质粉质粘土层	18	18.2	27.0	7.5	0.93
⑤ <sub>1</sub>	粉土层	23	7.1	27.1	1	0.68
⑥ <sub>1</sub>	粉质粘土层	27	10.1	27.2	1.5	0.63

盾构机需要在 305 m 小半径转弯和 30%下坡向 30%上坡过渡段同时出现的情况下连续穿越建筑物群,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。所穿越建筑物基础与结构较差,地质条件恶劣,对沉降比较敏感。

## 2 试验段掘进参数分析

为最大限度的降低盾构在复杂线路条件下(变坡度,小曲线半径等)下穿民房时引起的地面沉降,我们在下穿天塔湖前设立 45 m 试验段并布置监测点。其目的在于根据监测点位置的地面沉降量跟踪优化盾构掘进参数,分析在复杂地层条件下,参数对大坡度与小半径曲线位置盾构施工的适应性。通过盾构在里程 DK9+060.321 至 DK9+533.177 处下穿既有民房建筑物施工时,随地质、埋深、坡度、转弯半径等环境变化而调整参数,合理的确定盾构施工最优掘进参数。

### 2.1 监测点布置

选择与天塔湖前 45 m 试验段检测布点,每天监测 3 次,及时将结果反馈到现场总控室,为下步施工参数优化提供依据,必要时加大监测频次(如图 1 所示)。在施工过程中根据监测数据不断总结优化试验段总结的各项参数,以达到控制建筑物沉降的目的。

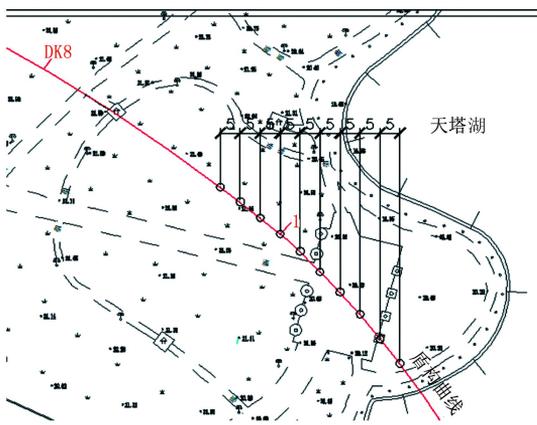


图 1 盾构试验段测点布置

## 2.2 参数选取

试验段选取掘进参数表如表 2 所示。

表 2 试验段掘进参数表

序号	参数	数值	备注
1	土仓压力	0.2 ~ 0.25 MPa	
2	盾构推力	13000 ~ 18000 kN	
3	掘进速度	20 mm/min	
4	注浆量	0.2 ~ 2 m <sup>3</sup>	140% ~ 200%
5	同步注浆压力	0.3 ~ 0.5 MPa	
6	刀盘转速	0.7 r/min	扭矩 < 2000 kN/m

## 2.3 监测结果

试验段监测数据如表 3 所示。

表 3 天塔湖前 45 m 试验段地面沉降监测数据

序号	中心里程	初值/m	末值/m	累计沉降/mm
1	DK8+081	6.272	6.220	-52
2	DK8+088	6.383	6.338	-45
3	DK8+094	6.383	6.333	-50
4	DK8+100	6.421	6.375	-46
5	DK8+106	6.333	6.291	-42
6	DK8+112	6.587	6.540	-47
7	DK8+119	6.542	6.494	-48
8	DK8+127	7.339	7.289	-50
9	DK8+132	6.587	6.540	-47
10	DK8+137	7.537	7.483	-44

## 2.4 数据分析

盾构掘进 DK8+081 ~ DK8+137 位置,各测点累计沉降值均较大,下面对 2、6、10 号测点做进一步分析,分别对这 3 个测点在盾构机通过前、通过中、通过后的沉降值统计分析。如表 4 所示:

表 4 测点在不同影响位置的沉降值

测点编号	测点与盾构机位置		
	通过前	通过中	通过后
2	-23	-21	-9
6	-24	-18	-7
10	-21	-20	-8

由表 4 可知:盾构机通过中,沉降较大,而在通过后,各测点沉降在规范要求范围之内,故注浆量满足要求;盾构通过前,地面有沉降,当盾构机大坡度掘进时,土仓压力值不能平衡土体压力而导致土体脱落损失,即土仓压力值 0.2 ~ 0.25 MPa 偏小。根据实验数据土仓压力由 0.2 ~ 0.25 MPa 的变化规律及施工经验,将土仓压力参数取为 0.3 MPa,采用数字计算模型分析。

## 3 大坡度及小半径推进盾构引起的地层变形分析

### 3.1 荷载取值

### 3.1.1 土压力的计算

施工中可以根据经验公式对正面平衡压力进行计算:

$$P = k_0 \gamma h$$

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

土压力的范围为 $0.30 \pm 0.05 \text{ MPa}$ 。在穿越建筑物、大坡度与急转弯这种施工条件下,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。

### 3.1.2 静态上浮力计算

当管片由地下水、泥浆或注浆浆液包裹时,由浮力定律,得管片环受到的上浮力为:

$$F_{\text{静}} = \pi R_0^2 \gamma_j$$

式中: $F_{\text{静}}$ ——注浆液体产生的静压力; $R_0$ ——管环外半径; $\gamma_j$ ——注浆液体容重。

$$F_{\text{静}} = 3.14 \times 3.1^2 \times 12 = 362.105 \text{ kN/m}$$

### 3.1.3 千斤顶推力

下坡时,盾构底部油缸的推力的增大将在设计轴线法线上产生一个向上的分力。

$$F_{\text{分力}} = \alpha T$$

式中: $F_{\text{分力}}$ ——油缸推力在轴线上产生的分力; $\alpha$ ——隧道坡度; $T$ ——油缸千斤顶的平均推力。

$$F_{\text{分力}} = 30\% \times 18000 = 540 \text{ kN}$$

### 3.2 计算模型设置

隧道轴线埋深 $15 \sim 20 \text{ m}$ , $y$ 方向为开挖方向, $z$ 方向为深度方向,计算模型按长 $60 \text{ m}$ ,高 $60 \text{ m}$ ,宽 $30 \text{ m}$ 设置,在模型中考虑盾构,主要研究模型中部 $30 \text{ m}$ 范围内的盾构开挖段(即 $y=0 \text{ m}$ 到 $y=36 \text{ m}$ ),网格纵向间距取 $1.2 \text{ m}$ ,以减小尺寸效应及边界引起的误差。

通过盾构刚度和载荷的迁移来模拟盾构实际前行过程,在盾首和盾尾预设单元,采用单元激活与“杀死”的方法处理单元刚度的变化,开挖面推进时,盾首逐渐深入,盾尾逐渐脱出。盾构前行的同时,盾构附属的其他结构包括载荷也必须前行。将盾构推进作为一个非连续的过程来研究,每次向前推进的长度为一个管片单元的宽度,同时变换单元材料。每顶进一环,盾首前方的开挖面土体单元和预设单元变为盾构单元和超开挖间隙单元,盾构壳尾部单元变为盾尾孔隙单元;而盾尾的孔隙单元变为浆体单元,同时沿开挖方向激活一环管片单元。计算模型如图2、图3。

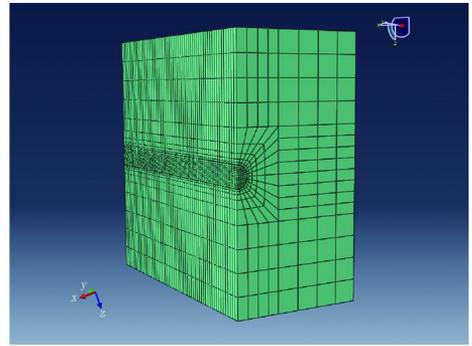


图2 对称计算模型

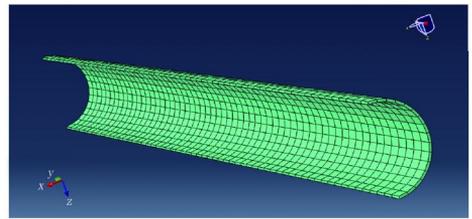


图3 管片衬砌单元

### 3.3 材料参数模拟

通过变换相应位置单元的材料、边界条件、及荷载的变化来反映盾构向前推进。

(1)将管片环模拟为梁的构架(直梁或曲梁),用旋转弹簧和剪切弹簧分别模拟管片接头和环间接头,将其弹性性能用有限元法进行构架分析。采用匀质圆环模型来模拟管片衬砌结构,用抗力的形式来模拟管片与围岩间的相互作用。由于曲线段管片必须反映其在空间的特殊形式,在采用地层结构法进行隧道受力计算时,管片内力采用修正设计法修正。

管片用各向同性壳单元(Shell)模拟。在计算程序中,壳体的力学性能主要包括2方面,即壳体材料自身的结构响应和壳体与岩土介质之间相互作用。壳体单元被认为是一个在3个节点上具有统一厚度的三角形,每个节点有6个自由度。壳体单元输入参数为:密度 $2500 \text{ kg/m}^3$ ;杨氏模量 $23 \text{ GPa}$ ;泊松比 $0.25$ ;厚度 $0.3 \text{ m}$ 。

(2)注浆层简化。认为土压平衡盾构机对土仓压力值控制较好,且计算时不考虑土体的蠕变作用。将地层损失引起的空隙厚度、注浆充填作用以及盾构机推进对周围土体的扰动作用简化为一等代层(扰动层),通过对不同阶段的试样进行无侧限抗压强度试验,得到等代层不同龄期的抗压强度和弹模。以转换单元性质(单元类型及力学参数)来实现。

(3)刀盘超挖间隙单元、盾尾操作间隙单元和盾尾脱空间隙单元采用低模量的软材料来模拟,弹

性模量一般取为岩土体的  $10^{-5}$ 。

(4)对被挖掉的岩土体单元,采用单元杀死的方法来模拟,把挖掉单元视为“空气单元”,将其模量取为极低值。对盾构开挖面卸荷引起的岩土体位移,在盾构开挖面前方设置卸荷单元,其弹模近似认为弹模为原来的 1/2。

### 3.4 计算结果

计算结果如图 4 所示。掘进过程中,在合理的土仓压力与注浆量参数控制下,在盾构前方地面有少许隆起,盾构刀盘上有沉降,管片脱离盾尾时,沉降最大。盾尾注浆量的多少,以及注浆量强度的大小,是累积沉降的关键。

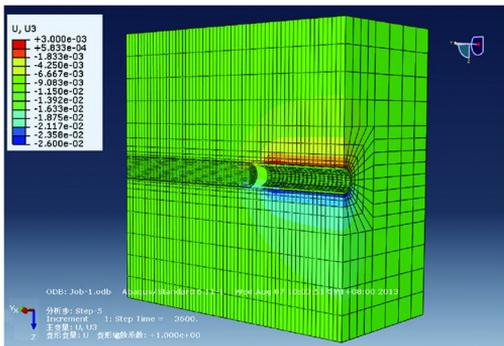


图 4 Z 方向位移分布云图

通过数值模拟计算可知,土层水平方向的地层位移值总体上不大,且随纵坡值增加仅有 2 ~ 3 mm 的增加,而地层竖向位移值随纵坡值变化相对明显。在隧道相同埋深的情况下,纵坡值每增加 10 时,平均最大沉降位移量增加 2% ~ 3%。与纵坡值相比,开挖面周围主应力的的大小受埋深影响的因素更为明显。

盾构开挖后,拱顶上部的地层产生沉降,拱底下部的地层产生隆起,拼装上的管片衬砌由于与地层密贴,因此,隧道拱顶也产生沉降,拱底隆起,并随着盾构的推进,已经拼装的盾构管片的隆沉变形也越来越明显。隧道掘进完成后,最大的沉降量为 26 mm,沉降值在城市地铁盾构施工的允许沉降值以内。只要保证盾构操作的正确和合理性,就能够安全通过建筑物穿越段。

### 4 监测量测数据

盾构机在下穿建筑物期间,每天监测 3 次,及时将结果反馈到现场总控室,为下步施工决策提供依据,必要时加大监测频次。

沿盾构掘进轴线在建国楼 25/26 号楼分别设置监控测点,监测盾构掘进过程中建筑物的变形特征,

并以表 5 所示的建筑物变形标准评价掘进参数的合理性。

表 5 建筑物变形标准

监测项目	累计变形极限值	差异沉降
建国楼 25/26 号楼建筑物沉降	80 ~ 100 mm	1/200 ~ 1/300

建国楼 25/26 号楼位于里程 DK9 + 180.6 附近,如图 5 所示,测点主要布置在盾构掘进线两侧,共对周边建筑物设置 9 个监控测点。各个测点监控结果如表 6 所示。

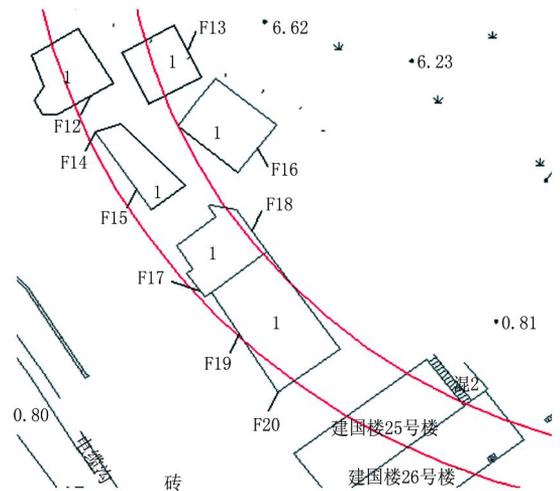


图 5 建国楼 25/26 号楼附近监测点布置图

表 6 各监测点沉降统计表

测点	累计沉降/mm	测点	累计沉降/mm	测点	累计沉降/mm
F12	-12.2	F15	-9.9	F18	-10.8
F13	-10.6	F16	-11.4	F19	-9.7
F14	-11.1	F17	-12.0	F20	-10.2

监测结果表明,在大坡度下坡向上坡过度并小半径转弯同时存在时,9 个测点在盾构掘进过程中,变化规律基本一致,盾构掘进满足平稳通过的要求。F12 对应建筑沉降最大,沉降为 12.2 mm,小于规范规定的 150 mm 的累计变形标准。

F12 与 F17 测点对应建筑差异沉降最大,约为  $1.2/3000 = 0.04/100$ ,小于规范规定的差异沉降要求。

### 5 结语

盾构机刀盘到达前和盾构盾尾脱出后,地层仍受到盾构掘进影响,发生沉降。当盾构掘进通过大坡度时,盾构机本身的质量巨大,盾壳光滑,在上下坡过程中,要考虑盾构机的自重,合理的土仓压力参数,是盾构顺利掘进的关键。

根据以上计算模拟及实际监测数据得出如下结

论。

(1)在复杂线路条件下,盾构掘进往往较一般条件下要复杂的多,盾构掘进的各参数是互相关联、相辅相成的统一体。

(2)千斤顶组最大、最小推力相差越大,地表横断面沉降槽不对称就越明显。千斤顶作用推力较大的一侧土体受较大推力而迫使土体向上隆起,而较小一侧受另一侧的挤压作用;土体受扰动范围增大,因此沉降值也越大。同时开挖面上的塑性区为不对称分布,推力较大一边剪切屈服区范围较大。

(3)盾构通过过程中,地层与盾壳之间间隙的存在(8 cm)和周围地层拢动的固结是地表沉降的主要因素。

(4)对同步注浆条件下等代层取不同弹性模量进行计算后,等代层弹性模量的变化对地表沉降的影响不是很明显。

(5)盾尾通过后,由于砂浆的固结和地层拢动后的固结,其沉降量较大。针对目前强透水地层和较深埋深,通过采用加大同步注浆量将地表隆起

方法来减小沉降。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。

#### 参考文献:

- [1] 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,2005,25(3):41-42.
- [2] 凌宇峰,李章林.小曲线半径盾构轴线控制技术[J].上海建设科技,2003,(1):34.
- [3] 赵运臣.盾构隧道曲线段管片破损原因分析[J].西部探矿工程,2002,(3):73-74.
- [4] 李强,曾德顺.盾构千斤顶推力变化对地面变形的影响[J].特种结构,2002,19(4):45-48.
- [5] 李永靖,张向东.城市地铁开挖对地表建筑物影响研究[J].地下空间与工程学报,2006,2(8):1326-1329.
- [6] 衡朝阳,滕延京,陈希泉.地铁盾构隧道周边建筑物地基基础变形控制研究[J].地下空间与工程学报,2006,2(8):1336-1340.
- [7] 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):80-84.
- [8] 吴涛.大坡度并小半径曲线连续穿越建筑群沉降施工控制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(11):80-84.

(上接第43页)

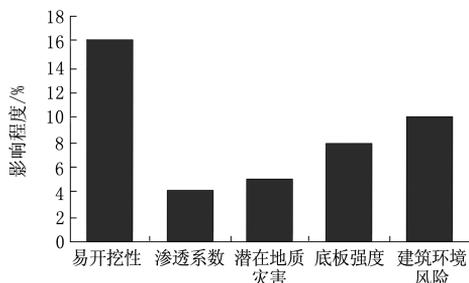


图4 隧道开挖风险性主要风险因素组合

#### 4 结语

在较复杂的地质环境中,地铁建设面临着隧道开挖风险和毗邻建筑环境的风险,因此,在地铁的勘察与设计阶段就应采用合理的风险评价方法对上述风险性进行详细评价,并找出主要影响风险源,以便在工程实践中对其危害性给予足够重视和防范,这对于控制工程风险、提高工程安全性和投资效益是完全必要的,是大型工程建设不可忽视的重要环节。本文在评价方法选取、风险因子组合遴选等方面为同类工程提供了可借鉴的示例。此外,还通过对评

价结果的再分析,给出了风险性程度与因子的耦合关系,这对有针对性地加强工程防范具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 蔡文,杨春燕,何斌.可拓逻辑初步[M].北京:科学出版社,2003.
- [2] 蔡文.物元模型及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994.
- [3] 中国原创学科可拓学30年走出新路[EB/OL].<http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2011/4/243385.html? id=243385>.
- [4] 第四期可拓学国际研究学者班将在罗马尼亚科学院举办[EB/OL].<http://web.gdut.edu.cn/~extenics/XueShuJiaoLiu.html>.
- [5] 美国、英国、印度、罗马尼亚等学者专程来华学习可拓学理论,并应用在所属的研究领域[EB/OL].<http://web.gdut.edu.cn/~extenics/XueShuJiaoLiu.html>.
- [6] 可拓学网址[EB/OL].<http://web.gdut.edu.cn/~extenics/>.
- [7] 范建华.环滇池城区地质环境资源综合评价与规划[D].吉林长春:吉林大学,2008.
- [8] Zou Ran, FAN Jianhua, CHEN Jianping, XIAO Yunhua. Suitability planning of urban underground space exploiting based on extenics of Kunming City[J]. Global Geology, 2012, 15(4): 297-301.
- [9] 刘卫林.基于多指标多级可拓评价的地下水环境脆弱性分析[J].地质灾害与环境,2007,18(1):83-87.