

文章编号: 1006 - 2106( 2011) 07 - 0094 - 05

## 建(构)筑物下盾构掘进施工隆沉控制\*

王辉\*\*

(中铁十七局集团上海轨道交通工程有限公司, 上海 200135)

**摘要:** 研究目的: 目前国家和地方还没有盾构穿越建(构)筑物的隆沉控制标准, 以及在盾构推进施工过程中地表隆沉多少才不会影响建(构)筑物的正常使用。在软土层地质条件下根据盾构机设备和施工参数的技术要求, 研究新型同步注浆浆液配合比、初凝时间、注入量以及二次双液浆注配合比注入量。分析研究推进过程中盾构机为中心的不同位置的隆沉。

**研究结论:** 在室内理论配合比的基础上, 结合施工现场操作和使用, 确定了满足施工技术要求的准厚浆配合比, 根据现场地面监测数据每环注入  $3.75 \text{ m}^3$  准厚浆和  $1.2 \text{ m}^3$  双液浆, 能控制地面沉降在  $10 \text{ mm}$  内。根据现场监测数据显示, 管片刚拖出盾尾时地面变化值最大, 同步注浆量要足, 二次注浆能有效控制后期沉降。建(构)筑物隆沉在  $-16 \sim +4 \text{ mm}$  范围基本没有影响。

**关键词:** 盾构设备; 穿越; 掘进参数; 建筑物隆沉; 准厚浆; 二次注浆; 砂质粉土

**中图分类号:** U455.43 **文献标识码:** A

## Control of Settlement Caused by Shield Excavation Construction Under Building and Structures

WANG Hui

(Shanghai Rail Transit Engineering Co. Ltd., China Railway 17th Bureau Group Co. Ltd., Shanghai 200135, China)

**Abstract: Research purposes:** At present there is no control standard for the settlement caused by shield excavation under building and structures in China and also there is no indication that how many the ground settlement will not affect the normal use of the building. According to the technical requirements of the shield machine and the construction parameters under the soft soil geologic conditions, the study was done on the slurry mixing proportion of synchro grouting, the time of initial solidification, the grouting volume and mixing proportion of secondary grouting. The analysis of the big settlement on the different positions centering the shield machine in course of shield tunneling was made.

**Research conclusions:** Based on mixing proportion of indoors theory and combined with the operation and use on the construction site, the mixing proportion of the quasi-mastic slurry that met the technical requirements was decided. The ground monitored data showed the ground settlement could be controlled within  $10 \text{ mm}$  range after the  $3.75 \text{ cubic meters}$  of quasi-mastic slurry and  $1.2 \text{ cubic meters}$  of double slurries were grouted and the biggest ground change appeared when the segment was just dragged out from the shield tail. So the synchronous grouting volume should be enough and the secondary grouting could effectively control the settlement in late stage. Basically there was no influence if the settlement of the structures and buildings was in the range from  $+4 \text{ mm}$  to  $-16 \text{ mm}$ .

\* 收稿日期: 2011-06-02

\*\* 作者简介: 王辉, 1975年出生, 男, 工程师。

**Key words:** shield machine; passing through; tunneling parameters; building settlement; quasi - mastic slurry; secondary grouting; sandy silt.

随着城市地铁交通的快速发展,盾构法施工对环境的影响要求越来越高。由于地质条件和地面环境的限制,盾构掘进施工难免对隧道周围土体产生扰动和流失,引起地表隆沉,致使地面建(构)筑物损坏,造成社会损失。如何将盾构掘进施工对地表隆沉影响控制到最低,是众多学者和施工技术人员研究的课题。

盾构法施工引起周围土层变形的内在原因是土体的初始应力状态遭到破坏,使得原状土经历了挤压、扭曲、剪切等过程且流失的水土没有及时补给。土层扰动的范围 and 程度取决于盾构机的选型、盾构掘进参数、推进盾构姿态、同步浆液性能和注入数量、二次注浆填充、土体性质、隧道线性、人员状态等因素。本文以苏州轨道交通2号线劳动路站—胥江路区间隧道施工为依托,结合盾构穿越建筑物科研项目,对建筑物下盾构掘进施工建筑隆沉作了阶段性总结。

## 1 工程概况

苏州地铁2号线劳动路—胥江路盾构区间隧道总长533 m,线路始于劳动路站南端,出站后以向南延伸下穿苏州砂轮厂、胥江、胥虹苑小区之后转入桐泾南路,最后到达胥江路站。线路总体为南北走向,区间线路以单一的缓坡上升至胥江路站,纵坡度3‰,水平曲线半径650 m。盾构隧道覆土厚度一般15 m左右,其中穿越胥江段覆土厚度约6.2~6.7 m。

隧道覆土依次为:①1 杂填土、②1 粉质黏土夹粉土、②2 粉质黏土、③3 粉土夹粉砂、④2 粉砂夹粉土、⑤1 粉质黏土及⑤1a 粉土。区间隧道穿越土层为④2 粉砂微承压水土层。

## 2 技术控制标准

地表和建(构)筑物隆起值 $\leq 4$  mm,沉降值 $\geq -16$  mm。盾构机盾尾姿态水平和垂直偏差控制值为 $\pm 30$  mm。

## 3 盾构选型和推进参数

### 3.1 盾构设备

盾构机采用日本小松 TM634PMX - 59 铰接式土压平衡盾构机。盾构直径6.34 m,长度8.68 m,盾构刀盘为面板式,开口率为40%;额定扭矩大于

5 147 kN·m,额定推力37 730 kN。同步注浆泵改用德国施维英泵。

### 3.2 土仓压力

隧道覆土厚度为15.01~15.42 m,土仓压力 $P = k_0(\gamma h + q)$ ( $P$ ——土压力(包括地下水); $\gamma$ ——土体的平均重度,取19.5 kN/m<sup>3</sup>;  $h$ ——隧道埋深,取15 m;  $k_0$ ——土的侧向静止土压力系数,根据地质详勘报告,加权平均后取0.5;  $q$ ——地面荷载),计算的理论土压力为0.146 MPa,在盾构推进时土仓压力略高于理论值0.01 MPa。盾构出加固区时土仓压力设置为0.13 MPa,正穿掘进段土仓压力设置为0.15 MPa,根据盾构机前头隆沉监测数据对土仓压力进行微调调整<sup>[1]</sup>,在没穿越房屋前摸索出经验数值。

### 3.3 掘进速度

推进速度控制在2.5~3 cm/min,匀速掘进。

### 3.4 盾构姿态控制

理论上盾构机和隧道在同一轴线上为最佳姿态,隧道设计一般是曲线;盾构机和每环管片为刚性圆筒体,盾构机和隧道的轴线组成折线;要想使盾构机和隧道的轴线近似在同一直线上,通过贴片增长的方式微调千斤顶接触的隧道法面上下或左右近似于设计状态,保证盾构机随隧道设计轴线的变化而变化,防止盾尾和隧道外圆折叠摩擦破坏盾构姿态<sup>[2]</sup>。要精心观测成型隧道的形状,通过管片拼装外翻内翻调整,保证隧道为圆形,且盾尾和隧道外圆的间隙均匀。要经常仔细观察隧道的线性趋势,控制好盾构机的推进趋势。

### 3.5 盾尾油脂及泡沫剂注入

选用法国进口康达特盾尾油脂及日本 TOYO 盾构泡沫剂。

### 3.6 同步注浆

3.6.1 采用以消石灰、粉煤灰、膨润土、细砂、水和减水剂为原料的新型浆液(准厚浆)代替传统的惰性浆液和可硬性浆液,其具有良好的长期稳定性及流动性、适当的初凝时间、良好的填充性能、不易产生稀释现象、固结体积收缩小、泌水率小的优点,可实现充填性、保水性、流动性、固结强度三者之间的良好匹配。新型改良浆液和传统浆液的主要区别在于胶凝材料用石灰代替水泥,提高了黄砂的用量<sup>[1]</sup>。新型改良型浆液和传统惰性浆液、可硬性浆液的性能对比如表1所示。

表1 新型浆液与惰性浆液、可硬浆液性能对比表

浆液名称 \ 指标	流动性	初凝时间	填充性	受地下水影响	固结收缩	泌水率/%	后期强度/MPa	对设备适应性
新型浆	较好	10-12 h	较好	难稀释	较小	7-10	1.0	不易堵管
惰性浆	较好	20 h左右	较差	易稀释	大	18-20	0.3	不易堵管
可硬性浆	较好	7-8 h	较好	易稀释	小	10-15	2.5	易堵管

3.6.2 生产配合比

通过试验室试验论证和现场拌制使用,确定基准

配合比方案(表2),基准配合比的技术指标如图1~

图4所示。

表2 基准配合比

每盘	水/kg	黄砂/kg	粉煤灰/kg	膨润土/kg	石灰/kg	外加剂/kg
0.75 m <sup>3</sup>	300	600	300	50	40	1.5

注:浆液以控制坍落度为中心,浆液配比中水的用量根据砂的含水率适当调整。

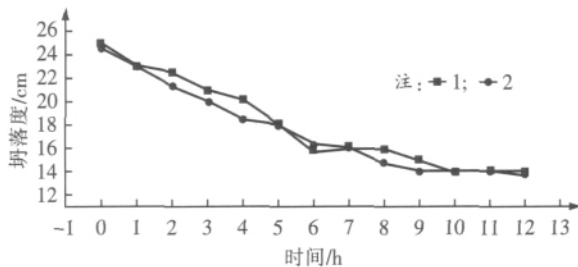


图1 基准配比浆液坍落度经时变化曲线

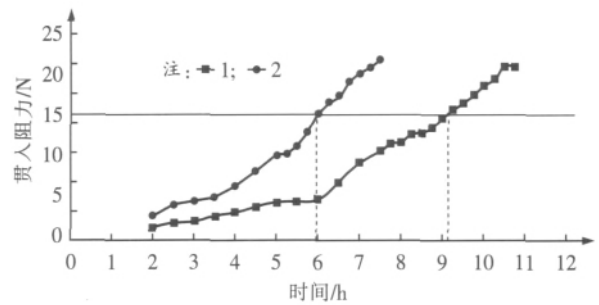


图4 推荐配比浆液的凝结时间曲线

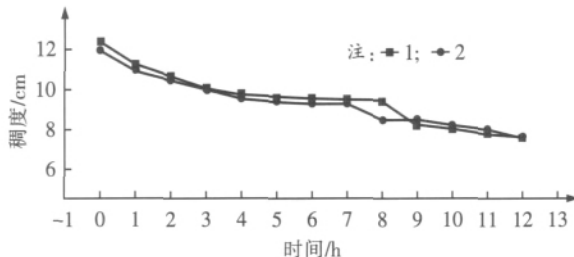


图2 基准配比浆液稠度经时变化曲线

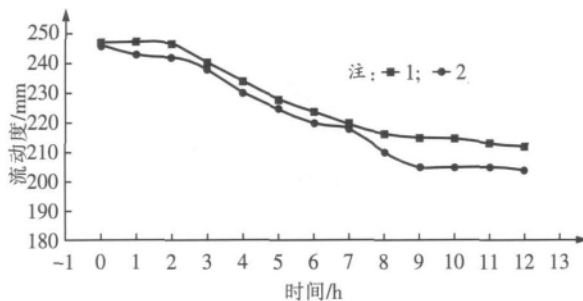


图3 基准配比浆液流动度经时变化曲线

3.6.3 浆液性能控制指标(表3)

表3 浆液性能指标控制指标

名称	性能指标
坍落度	初始值 24~26 cm 2小时内不低于 22 cm
稠度	10~12 cm
凝结时间	≥6 h
抗压强度	R <sub>7</sub> > 0.15 MPa; R <sub>28</sub> > 0.5 MPa
密度	> 1.70 g/cm <sup>3</sup>

3.6.4 同步注浆方量

每推进一环建筑空隙为:  $\pi(6.34 - 6.2) \times 1/4 \times 1.2 = 1.656 \text{ m}^3$ ; 盾构外径: 6.34 m; 管片外径: 6.2 m; 每环注浆量取建筑空隙的 220%, 即每环同步注浆量取 3.75 m<sup>3</sup>。

3.6.5 同步浆液拌制注意事项

按需拌浆,每盘 0.75 m<sup>3</sup>拌制时间不少于7 min。

投料顺序为:先投干料即黄砂、石灰、膨润土,边搅拌边添加粉煤灰,干料搅拌 2 min,均匀后添加 160 kg 水搅拌 2 min,再加入 120 kg 水搅拌 2 min,最后加入 20 kg 水作为调节用水,即根据拌出的浆液情况适当添加。最后投放外加剂搅拌至满足要求。拌浆的关键点是水要分 3 次加入,边拌边加。

指派 2 名专职拌浆人员,按照“定机定岗、责任明确、分工到人”的原则,严格做好拌浆记录,确保浆液拌制质量。

加强自检控制,每 4 盘(1 环注浆量)测一次坍落度和稠度指标,并做好测试记录。浆液初始坍落度不小于 24 cm,2 小时坍落度不小于 22 cm,4 小时坍落度不小于 20 cm。

3.7 二次注浆

采用水玻璃、水泥浆混合双液浆。水玻璃用水稀

释 1 : 3 , 水泥浆水灰比 1 : 1 , 水泥浆与水玻璃体积比 1 : 1 。注浆时间为管片脱出盾尾 5 环开始注入 , 第 7 环管片脱出盾尾前注完。注浆压力: 0.3 ~ 0.5 MPa , 注浆量每环控制在 1.2 m<sup>3</sup>[2] 。

### 4 地面监测点布设

监测仪器: 徕卡 NA2 水准仪加 FS1 平板测微器。

测点布置: 轴线上每 3 环布设一个地面监测点; 每 10 环布设一个小断面点( 5 点断面); 每 20 环布设一个大断面点( 7 点断面) 。

监测范围及频率: 盾构机刀盘前 10 环 , 盾尾后 20 环; 每天 2 次( 上午 7:00 和下午 16:00 各一次) 。

### 5 监测数据分析

#### 5.1 以首 50 环轴线点累计沉降数据为例进行沉降分析

从首 50 环累计沉降曲线分析可知 , 累计最大隆起点为 25 环 , 隆起量为 + 3.80 mm , 累计最大沉降点为 45 环 , 沉降量为 - 11.87 mm , 单次最大沉降点位 L45 断面( 45 环) , 沉降量为 - 3.36 mm; 首 50 环累计沉降如图 5 所示。

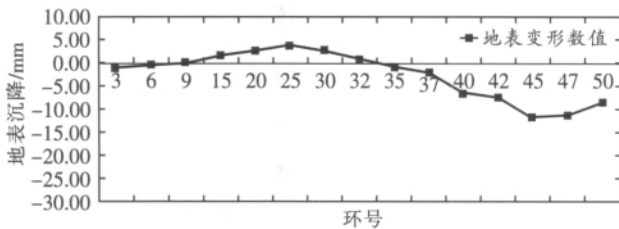


图 5 盾构首 50 环累计沉降( 单位: mm)

#### 5.2 最大累计沉降分析

盾构推进至 44 环时进行负环拆除 , 更换出土箱、 出土口 , 同时进行停机保压 , 转换后春节期间进行一个班作业。节日期间由于出土不便 , 盾构施工临时调整为隔天推进 , 地表在 42 环、 45 环、 47 环位置累计沉降较大 , 最大点 45 环沉降量为 - 11.87 mm。L45 环累计沉降数值如图 6 所示。

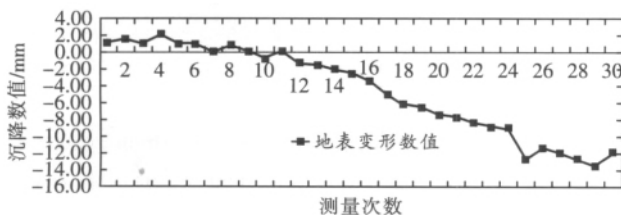


图 6 L45 环累计沉降数值

#### 5.3 典型断面沉降分析

盾构切口环推至 L40 监测断面点( 盾尾拼装 35 环) 时 , 土压设定为 0.15 MPa , 地面有少许隆起 , 隆起量达 1.20 mm[3]; 盾构机本体通过 L30 测点时 , 断面点均有所沉降 , 最大沉降量 - 1.21 mm; 管片脱出盾尾时 , 断面中心监测点沉降量达到最大 , 沉降量为 - 2.32 mm , L40 断面沉降数值( 次变量) 如图 7 所示。

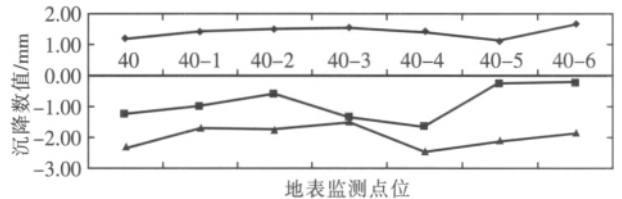


图 7 L40 断面沉降数值( 次变量)

#### 5.4 盾构进出洞加固沉降分析

盾构空仓出洞 , 加固区段不断提升土压 , 至刀盘出加固区时 , 土压增至 0.16 MPa , 加固区段刀盘最大扭矩的 43% , 最大推力 2 800 t。盾构于 + 5 环进行同步注浆 , 浆液采用准厚浆 , 每环注入 4 m<sup>3</sup> , 压力 0.8 MPa。L9 监测点位为加固区与非加固区交界点位 , 隆起最大为 4.67 mm , 沉降后最小值 0.46 mm , 稳定值为 1.65 mm。L9 环、 L15 环沉降过程曲线如图 8 所示。

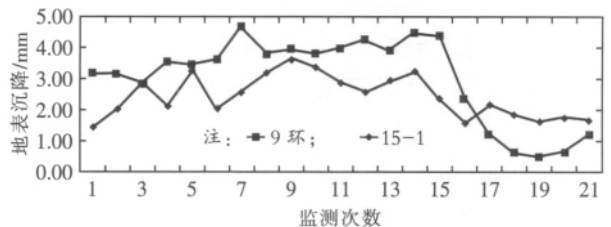


图 8 加固区沉降曲线图

#### 5.5 盾构机停机保压沉降分析

隧道于掘进至第 44 环时开始拆除负环 , 盾构出土方式转换 , 停机时间 4 d。

保压目标: 土仓压力不小于 0.15 MPa。

保压过程: 正式停机时间为 2011 年 1 月 27 日上午 9:00 , 停机时土仓压力为 0.16 MPa。2011 年 1 月 29 日下午 16:00 土仓压力掉至 0.11 MPa , 通过反转出土螺旋机将土仓压力重新调整至 0.15 MPa; 至 1 月 31 日再次推进 , 土仓压力最低掉至 0.11 MPa。停机 4 天地表沉降曲线图( 次变量) 如图 9 所示。

### 6 结论

( 1) 土仓压力与推进速度是引起刀盘前方底层隆起的主要因素。试验段设置土仓压力略大 , 使刀盘前

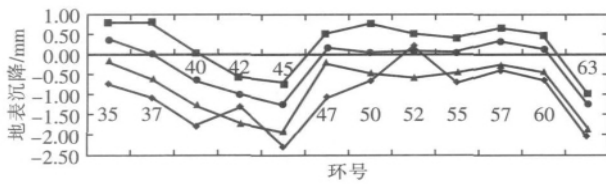


图9 盾构停机四天沉降曲线图

方土层有较小的隆起,随着盾构机通过,土体的固结,隆起值回落,并开始缓慢沉降。从控制地面沉降来看,此种掘进方式可以有较好的效果。

(2) 在管片脱离盾尾时,地层存在着明显的下沉阶段,管片脱离盾尾的同步注浆可以有效地控制地面下沉。根据现场试验,在粉质黏土层中按照建筑间隙的214%注入,可避免盾尾漏浆,又可较好地控制地面沉降。

(3) 同步注浆浆液采用准厚浆,坍落度控制在25~26 cm之间,初凝时间长,流动性和保水性好,可完全适应盾构同步注浆系统。同步注浆浆液在拌制过程中水应分三次加入,防止膨润土水化不充分形成疙瘩,影响浆液质量。

(4) 二次注浆及时压注能有效控制地面二次下沉的趋势,二次注浆采用双液浆压注,使填充土体的浆液迅速凝结,可以有效地控制地面二次下沉,使地面沉降趋于稳定。根据现场实践,在粉质黏土地层中二次注浆应于脱出盾尾7环开始注入,脱出盾尾9环注完,注入量 $1.2 \text{ m}^3$ 。

(5) 鉴于准厚浆的粘稠度较大,储浆罐、转驳浆箱、台车浆箱使用一段时间后,会在浆箱的四壁凝结成较厚的硬块。一旦硬块脱落入浆液,对转驳泵和同步

注浆泵的损害较大,同时影响浆液注入。建议每班交班对浆箱用水清洗,每5天对浆箱进行彻底清理。

(6) 准厚浆配比中黄砂的掺入量较大,该浆液遇水易沉淀,同步注浆管路采用清水冲洗容易,浆液容易在管壁上沉淀结块,一段时间后会淤积堵塞,影响浆液注入。建议采用膨润土浆液冲洗管路。

(7) 通过此试验分析,对苏州软土地层,通过盾构参数合理设置,同步注浆量及浆液质量有效控制,二次注浆(双液浆)及时跟上,可有效将地面沉降控制在10 mm左右。

## 参考文献:

- [1] 季大雪. 武汉长江隧道盾构下穿武九铁路沉降影响分析[J]. 铁道工程学报, 2009(10): 21-24.  
Ji Daxue. Analysis of the Influence of Underpass Shield of Auhun Yangtze River Tunnel on Settlement of Wuhan Jiujiang Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(10): 21-24.
- [2] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(3): 388-392.  
Zhang Yun, Yin Zongze, Xu Yongfu. Analysis of Three-Dimensional Ground Surface Deformations Due to Shield Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(3): 388-392.
- [3] 沈培良, 张海波, 殷宗泽. 上海地区地铁隧道盾构施工地面沉降分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003(5): 556-559.  
Shen Peiliang, Zhang Haibo, Yin Zongze. Ground Settlement Due to Shield Construction in Shanghai Metro Tunnel Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003(5): 556-559.

(上接第82页)

[4] 李现森, 付迎春, 孙星亮. 青黄海底隧道接线工程近接地面建筑物爆破震动控制数值分析[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2007(12): 71-74.

Li Xiansen, Fu Yingcun, Sun Xingliang. A Finite Element Analysis of Blasting Vibration in Qingdao-Huangdao Cross-harbor Tunnel Guide Line Project [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural Science), 2007(12): 71-74.

[5] 李旭东, 白海峰, 周志顺. 地面建筑物控制爆破的浅埋隧道暗挖方法研究[J]. 铁道工程学报, 2011(1): 47-50, 57.

Li Xudong, Bai Haifeng, Zhou Zhishun. Study on

Blasting Subsurface Excavation Method for Shallow Tunnel Under-passing Ground Building [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(1): 47-50, 57.

[6] GB 6722—2003, 爆破安全规程[S].

GB 6722—2003, Safety Regulations for Blasting [S].

[7] 张继春, 曹孝君, 郑爽英, 等. 浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(11): 4158-4163.

Zhang Jichun, Cao Xiaojun, Zheng Shuangying, etc. Experimental Study on Vibration Effects of Due to Shallow Tunnel Blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(11): 4158-4163.