

# 浅谈大直径盾构超浅埋软土地层始发的施工技术研究

王贤福<sup>1</sup>, 周 霄<sup>2</sup>

(1. 杭州市市政公用建设开发有限公司, 浙江 杭州 310009; 2. 杭州天恒投资建设管理有限公司, 浙江 杭州 310004)

**摘要:** 结合杭州某隧道工程, 介绍了大直径盾构超浅埋软土地层始发的施工技术。重点对隧址地层的岩土特性、水文情况、周边环境进行了分析, 剖析了本工程大直径盾构超浅埋软土地层始发的重难点, 并提出了解决措施方案。

**关键词:** 大直径盾构; 浅埋软土始发; 端头加固; 始发控制; 沉降监测

**中图分类号:** TU745 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7195(2020)04-0322-08

## Construction technology of large diameter shield launching in super shallow soft soil layer

WANG Xian-fu<sup>1</sup>, ZHOU Xiao<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Municipal Public Construction Development Co., Ltd., Hangzhou 310009, China;

2. Hangzhou Tianheng Investment Construction Management Co., Ltd., Hangzhou 310004, China)

**Abstract:** In combination with a tunnel project in Hangzhou, this paper introduces the construction technology of large-diameter shield launching in super shallow soft soil layer. It focuses on the analysis of the geotechnical characteristics, hydrological conditions, and surrounding environment of the tunnel site. The key points and difficulties of the project were analyzed and the corresponding solutions were proposed.

**Key words:** large-diameter shield; shield launching in super shallow soft soil; end-wall reinforcement; shield launching control; settlement monitoring

## 0 引言

盾构始发一般顶部埋设深度为  $0.8 \sim 1.0 D$  ( $D$  为盾构外径)。覆土过浅时会使盾构推进中出现“漂浮”现象, 对地面或地下构筑物有较大的影响。

本工程盾构始发井东侧为一般明挖段上跨既有地铁线路, 隧道底标高受上跨地铁限定; 工作井西侧为既有建筑物(过街天桥), 限定了工作井至上跨地铁的距离, 城市道路设计坡度 4% 以内; 受到上述因素的影响, 本工程盾构始发覆土不到 7 m, 形成了大直径盾构超浅埋软土地层始发。

## 1 工程背景

### 1.1 工程地质

盾构隧道始发段地质自上而下依次为: ①<sub>1</sub> 杂填土、④<sub>1</sub> 淤泥质黏土、④<sub>2</sub> 淤泥质粉质黏土夹粉土、⑤<sub>1</sub> 粉质黏土、⑥<sub>1</sub> 淤泥质黏土、⑥<sub>2</sub> 黏土、⑦<sub>1</sub> 黏土、⑧<sub>2</sub> 黏土、⑨<sub>1</sub> 含砂粉质黏土、⑨<sub>2</sub> 粉砂、⑩<sub>1</sub> 含砾粉质黏土、⑫<sub>1</sub> 全风化粉砂质泥岩、⑫<sub>2</sub> 强风化粉砂质泥岩、⑫<sub>3</sub> 中等风化粉砂质泥岩, 隧道顶部埋深为 6.5~14.37 m。隧道顶与隧道开挖范围内主要为: ①<sub>1</sub> 杂填土、④<sub>1</sub> 淤泥质黏土、④<sub>2</sub> 淤泥质粉质黏土夹

粉土、⑤<sub>1</sub>粉质黏土、⑥<sub>1</sub>淤泥质黏土。

### 1.2 水文情况

杭州素以江南水乡湿地而著称，地表水系发达，河网交错。本区地表水体主要为河流，以人工河渠为主，大多为运河水系。

#### (1) 地表水

本标段线路穿越地表河流 2 条，属城市内河，河道坡度很小，河流水流缓慢，属淤积性河道。水深分别约 1.5~2 m、2~3 m，施工区域北侧与京杭运河平行，相距 80~100 m 左右。

#### (2) 地下水

场地勘探深度以浅的地下水类型按其含水介质、水动力特征及其赋存条件，主要分为第四系松散岩类孔隙潜水、孔隙承压水和基岩裂隙水 3 类。详见表 1。

表 1 地层渗透系数

Tab. 1 Permeability coefficient of each strata

地层	渗透系数/(m/s)
④ <sub>1</sub> 淤泥质黏土	2.17×10 <sup>-9</sup>
④ <sub>2</sub> 粉质黏土夹粉土	3.99×10 <sup>-8</sup>
⑤ <sub>1</sub> 粉质黏土	3.86×10 <sup>-9</sup>
⑥ <sub>1</sub> 淤泥质黏土	1.67×10 <sup>-9</sup>
⑥ <sub>2</sub> 黏土	1.22×10 <sup>-9</sup>
⑦ <sub>1</sub> 粉质黏土	1.39×10 <sup>-9</sup>
⑦ <sub>4</sub> 含黏性土砾砂	6.0×10 <sup>-6</sup>
⑧ <sub>2</sub> 黏土	2.19×10 <sup>-9</sup>
⑨ <sub>1</sub> 含砂粉质黏土	2.85×10 <sup>-9</sup>
⑨ <sub>2</sub> 砾砂	6.2×10 <sup>-6</sup>
⑩ <sub>1</sub> 黏土	1.65×10 <sup>-9</sup>
⑩ <sub>1</sub> 含砾粉质黏土	5.0×10 <sup>-9</sup>

### 1.3 周边环境

#### (1) 周边道路及交通状况

盾构始发段位于杭州繁华区主干道，盾构始发施工期间，施工围挡两侧为城市主干道车行道，原双向 9 车道，现改为双向 6 车道，车流量较大。

#### (2) 周边建筑物分布情况

始发段掘进施工时，始发段隧道开挖面距离最近的构筑物 30 m 左右，掘进时重点做好沉降观测。

#### (3) 周边管线分布情况

根据设计提供管线资料及管线探测，经调查盾构始发区域施工区域周边主要管线类型有污水、燃气、雨水、通信、电力、给水等各类管线。详见图 1。

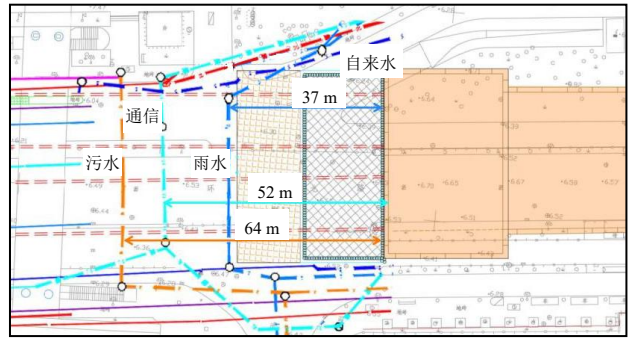


图 1 始发端管线平面图

Fig. 1 Pipeline plan of the shield launching shaft

## 2 盾构超浅埋软土地层始发方案的确定

盾构刀盘开挖直径为 13.5 m，管片外径为 13 m，内径 11.9 m，厚度 0.55 m，隧道管片每环由 10 块组成，错缝拼装。

### 2.1 难点分析

盾构进洞共 180 m，覆土厚度在 6.5~13.5 m，覆土厚度均小于 1 倍洞径，盾构浅覆土段所处地层主要以④<sub>1</sub> 淤泥质黏土、④<sub>2</sub> 淤泥质粉质黏土夹粉土、⑥<sub>1</sub> 淤泥质黏土为主，地基承载力低，自稳性较差，始发端覆土厚度约 6.5 m；地面沿线车、人流量大，在施工过程中极易出现地面沉降、坍塌的风险，从而造成地面交通瘫痪、管线、周边建（构）筑物破坏等风险。

### 2.2 解决措施

(1) 为了减小盾构始发风险，盾构始发端分别设置加固一区、加固二区。

(2) 在端头地层加固施工完毕之后，对加固区域进行垂直取芯，用以检测加固效果。

(3) 严格控制主要掘进参数：总推力、扭矩、推进速度、注浆量，采用低速均匀掘进，避免对土体产生大的扰动，防止超挖和欠挖。

(4) 考虑到覆土较浅，盾构及管片由于浅覆土可能发生“上飘”，为抵消上飘的影响，盾构掘进时，盾构中心与隧道设计高程的偏差控制在 -30 mm，平面偏差控制在 ±30 mm 之内，施工期间严格控制隧道轴线，使盾构尽量沿着设计轴线推进，每环均匀纠偏，减少对土体的扰动。

(5) 提高同步注浆质量，要求浆液有较短的初凝时间，使其遇泥水后不产生裂化，并要求浆液具有一定的流动性，能均匀地布满隧道一周，及时充填建筑空隙；当发现隧道上浮量较大，且波及范围

较远时应立即采取对已建隧道进行补压浆措施,以割断泥水继续流失路径。

(6)在同步注浆的基础上,结合二次注浆(浆液采用水泥-水玻璃双液浆,水灰比为1:1,水泥浆:水玻璃=1:0.5)在隧道周围形成环箍,始发阶段每隔6m打一道封水环箍,使隧道纵向形成间断的止水隔离带,以减缓、制约隧道上浮,从而控制隧道变形。环箍注浆根据注浆压力控制注浆量,二次注浆压力大于同步注浆压力0.2kPa。

(7)加强隧道纵向变形的监测,并根据监测的结果进行针对性的注浆纠正。如调整注浆部位及注浆量,配制快凝及提高早期强度的浆液。

(8)加强信息化施工,通过监测系统提供的测试数据,及时调整与控制盾构穿越过程中的施工参数,必要时采取地面跟踪注浆措施。

### 3 始发端头加固

#### 3.1 端头加固目的

本工程的始发端头加固有2方面的作用,一方面是为盾构始发提供稳定的地层条件,保证安全、顺利始发,另一方面是为盾构吊装提供足够的地基承载力,保证盾构组装时吊机在吊装作业过程中的安全。

#### 3.2 端头加固方式

本工程端头加固分2个区段。一区加固长度20m,加固宽度45.18m,加固深度自地面至盾构底部6m位置。二区加固长度15m,加固宽度45.18m,加固深度自地面至隧道顶部0.5m。加固均采用 $\Phi 850@600$ 三轴搅拌桩满堂加固。三轴搅拌

桩与端头地连墙间预留400空隙,以施做单排 $\Phi 800@600$ 双重管高压旋喷桩。加固体采用42.5级普通硅酸盐水泥,加固水泥参量20%。加固体28d无侧限抗压强度不小于1.0MPa。详见图2~图4。

#### 3.3 加固效果检查

##### (1) 加固体渗透系数要求

在加固体的强度达到要求以后,需要对加固区的渗漏性进行检查,要求渗透系数不大于 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ,土体渗透性检测采用现场降水试验进行验证。

##### (2) 取芯强度检查要求

###### a) 竖直取样

端头加固完成28d后进行加固体强度效果检查,检测为总桩数的1%,且不得少于5根,洞门加固区桩的咬合位置取芯不少于2个,分别离桩芯为15cm、30cm和45cm的地方,进行全孔取芯钻孔,观察芯样,土体处理的芯样连续性大于90%。高压旋喷桩芯样无侧限抗压强度不小于1.0MPa,取芯点位分布如图5所示。现场已对加固区进行取芯,取芯15根,经芯样检测,加固体无侧限抗压强度均大于1.0MPa,满足设计要求。

###### b) 水平取样

在洞门范围内布置15个水平探孔,深度3m,钻孔顺序由上部向下部,由洞门边缘向中间开始钻孔,其中外圈探孔设置外插角斜向布置。探孔主要分布在洞门边缘位置,以便确认旋喷桩及素墙隔水效果。始发端头加固水平探孔如图6所示。水平探孔出水量不大于40L/h,且出水中不得流泥流砂、无明显线流。

若发现水平探孔仍有较大渗流,需对渗流部位进行水平深孔注浆进行补强。

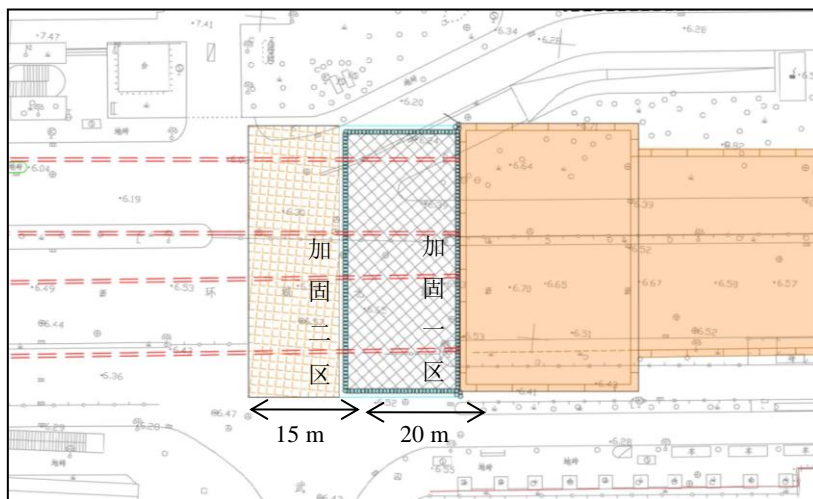


图2 端头加固平面图

Fig. 2 Layout plan of the end-wall reinforcement

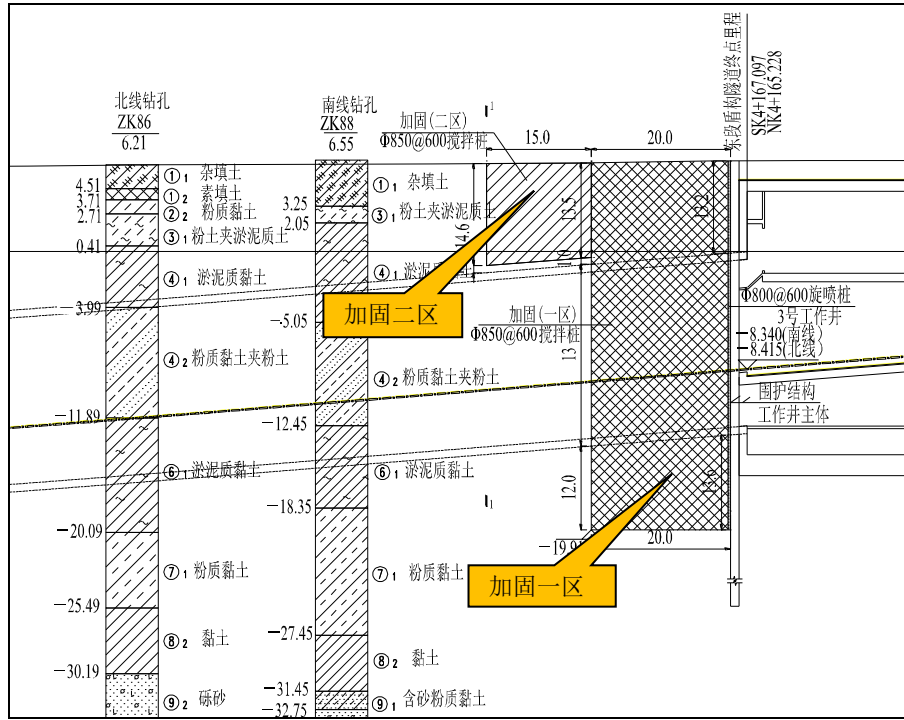


图3 加固区纵剖面图

Fig. 3 Longitudinal section of reinforcement area

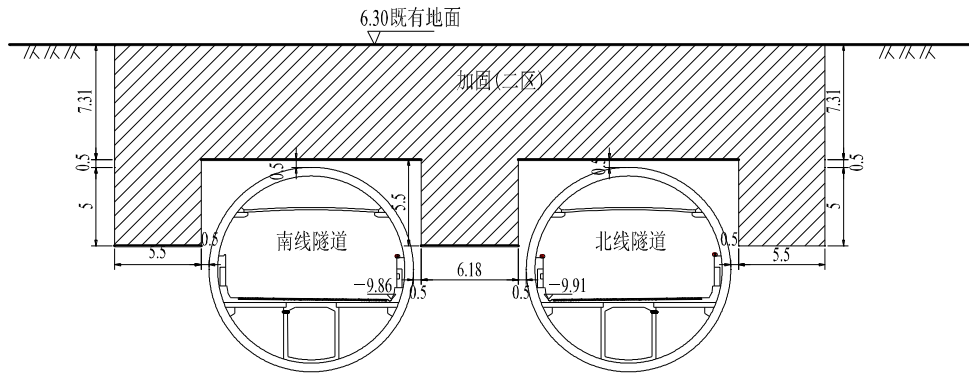


图4 二区加固区横剖面图

Fig. 4 Cross section of reinforcement area in zone II

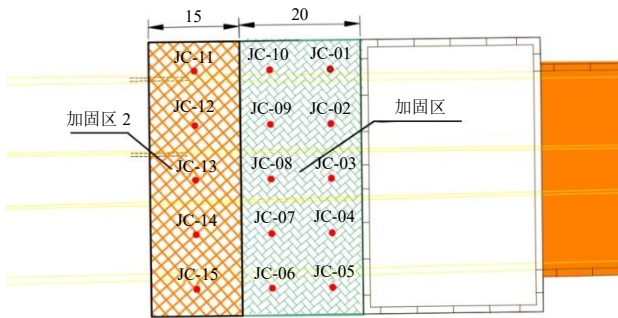


图5 始发端头加固垂直探孔布点图

Fig. 5 Layout of vertical exploratory holes for reinforcement of the shield launching shaft

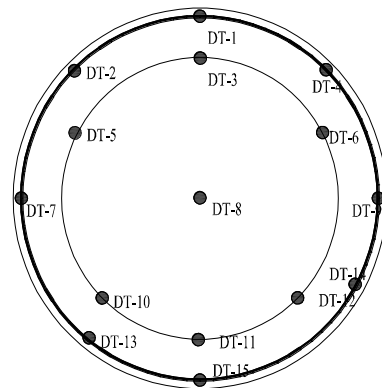


图6 始发端头加固水平探孔布点图

Fig. 6 Layout of horizontal exploratory hole for reinforcement of the shield launching shaft

### 4 端头降水

为防止始发时穿越洞门过程中发生涌砂、涌泥等不良地质作用，始发前对始发井端头加固区域进行降水，降水井的降水深度隧道底部不少于1 m。降水井在始发端头旋喷桩及补充注浆完成后进行施工。

降水井施工采用冲击成孔施工工艺，降水井钻探孔径600 mm，降水井管全部采用钢质焊管，其中井壁管长度为5~7.5 m，壁厚4 mm，过滤管长度为5~22.5 m，壁厚3 mm，管径250 mm。详见图7和图8。

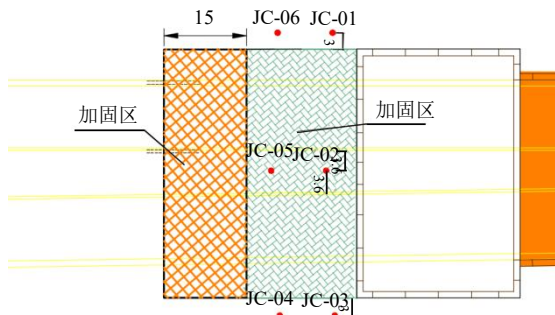


图7 降水井平面布置图

Fig. 7 Layout plan of dewatering well

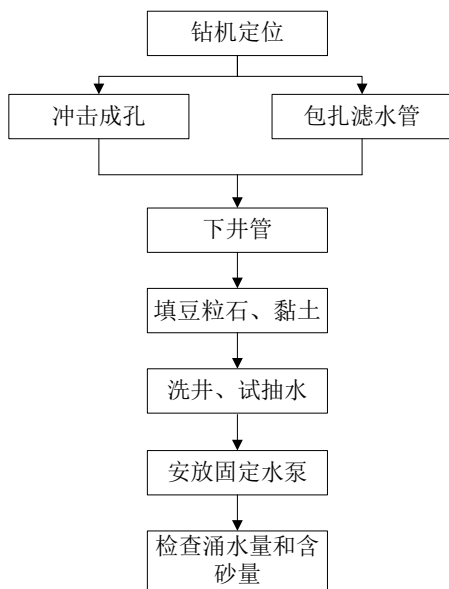


图8 降水井施工流程图

Fig. 8 Construction flow chart of dewatering well

在洞门凿除前需进行降水观测，观测方法为保证动水位降到隧道底板以下2 m后，对静水位进行监测，以达到隧道底部1 m以下。

根据降水需要，降水井采用深井潜水泵，水泵流量80 m<sup>3</sup>/h，扬程33 m，电机功率5.5 kW。

结合端头地质条件，采用深井泵进行疏干性抽水，当抽水一段时间以后，单井出水量逐渐减小，为确保疏干效果，应加大水位监测频率。

降水运行期间，降水井每天观测1次，降压观测井运行后每天观测2次，水位观测精度±1.0 cm。抽水过程中应做好记录，内容包括井涌水量(Q)、水位降深(S)，以掌握动态，指导降水运行，不断优化降水运行方案。

盾构顺利始发后，并进行洞门封堵注浆再停止降水，对降水井进行封堵，采取压密注浆或水下混凝土浇注封填方式，封堵井孔，并加焊封口钢板。

### 5 始发平面、纵坡控制

盾构机始发前，首先在底板上布设测量控制点，复测好洞门钢环实际位置，复测完成后根据实测的数据对盾构机始发台中心位置进行修正。盾构始发水平、垂直线路模拟情况见图9、图10。

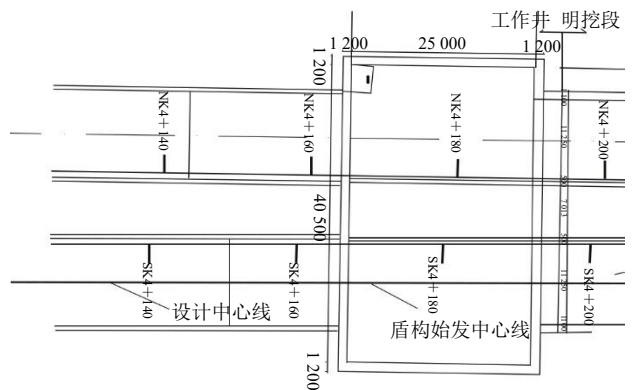


图9 盾构始发水平向拟合

Fig. 9 Horizontal fitting of shield launching shaft

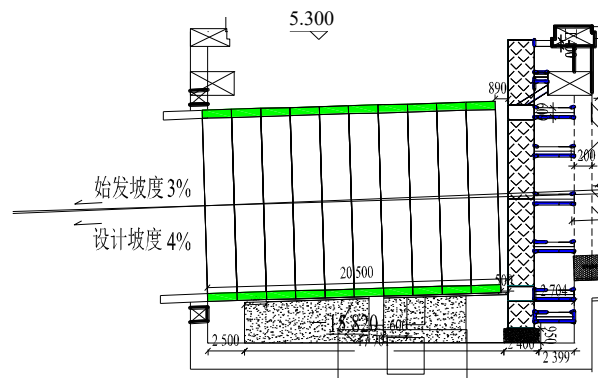


图10 盾构始发纵向拟合

Fig. 10 Longitudinal fitting of shield launching shaft

### 6 始发段注浆

#### 6.1 同步注浆

(1) 同步注浆实施时间及浆液性能的选择

由于盾构隧道大部分穿越淤泥质粉质黏土,结合国内大断面泥水盾构施工事例以及杭州环城北路、庆春路隧道盾构施工事例,同步注浆采用厚浆或水泥浆方式进行,浆液的配比如表2、表3。当盾尾通过2道洞门密封后开始实施同步注浆。固体强度:一天不小于0.2 MPa(相当于软质岩层无侧限抗压强度),28 d不小于1 MPa。

根据计算和经验,注浆压力取值为:0.2~0.5 MPa,在一般土质地层中,注浆量充填系数为150%~200%,注浆量应满足规范要求,见图11。

(2) 同步注浆施工注意事项

- a) 同步注浆系统在调试结束后应将注浆孔(包括备用孔)用油脂充填密实;
- b) 同步注浆一定要在盾尾通过钢丝刷密封后再实施,避免同步注浆降低洞门密封的效果;
- c) 始发阶段由于盾构掘进速度相对较慢,且浆液凝结时间相对较快,要隔一定的时间对注浆管路进行清洗疏通,避免浆液凝结堵塞注浆孔;
- d) 加固区内同步注浆注意压力控制,避免注浆压力过大导致浆液进入盾尾密封尾刷影响密封效果。

6.2 二次注浆

根据施工情况,在始发过程中若发生洞门漏水、

漏浆、发生较大沉降或发生突发险情时,启动二次注浆系统。注浆材料采用水泥~水玻璃双液浆,注浆顺序从底部注浆孔左右对称向上注浆,水泥采用P.O 42.5 普通水泥,水灰比采用1:1;玻美度控制在25~35 be之间;水泥浆:水玻璃体积比1:1,双液浆凝固时间为40 s左右注浆时必须密切关注洞门密封装置的变形情况,出现漏浆及时停止注浆,可采用间歇性注浆方法。

7 盾构始发姿态控制

为防止盾构始发过程中机头脱离始发台时载头,始发采用抬头始发施工,盾构在始发推进过程中,初始线路与原设计线路有稍许偏差。当这种偏差超过一定限时就会使隧洞衬砌侵限、盾尾间隙变小使管片局部受力恶化,并造成地层损失增大而使地表沉降加大,因此盾构施工中必须采取有效技术措施控制掘进方向,及时有效纠正掘进偏差。

7.1 盾构始发掘进姿态控制

确保盾构机沿着设计线路掘进是隧道施工的一个主要目标,因此,掘进中方向的控制十分重要,线路中线平面位置和高程的允许偏差易控制在±20 mm。

表2 同步注浆水泥浆配比表

Tab. 2 Formulation of cement slurry for synchronous grouting

水泥/kg	粉煤灰/kg	膨润土/kg	砂/kg	水/kg	外加剂
120~260	381~241	60~50	779	460~470	按需要根据试验加入

表3 同步注浆厚浆配比表

Tab. 3 Formulation of high-density slurry for synchronous grouting

同步注浆方量	配合比						备注
	水/kg	水泥/kg	石灰/kg	细砂/kg	粉煤灰/kg	膨润土/kg	
1 m <sup>3</sup>	300	25	80	1 290	300	50	水用量根据河砂含水量适时调整

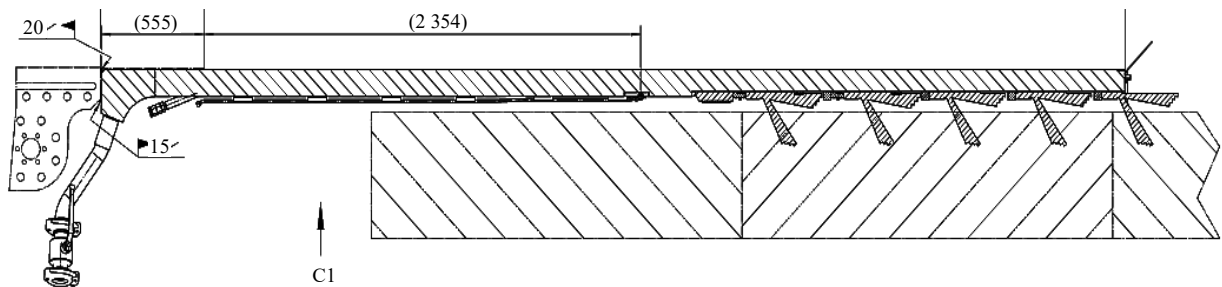


图11 同步注浆示意图

Fig. 11 Schematic diagram of synchronous grouting

(1) 采用 VMT 自动导向系统和人工测量辅助进行盾构姿态监测

该系统配置了导向、自动定位、掘进程序软件和显示器等,能够全天候在盾构机主控室动态显示盾构机当前位置与隧道设计轴线的偏差以及趋势。据此调整控制盾构机掘进方向,使其始终保持在允许的偏差范围内。

随着盾构推进导向系统后视基准点需要前移,必须通过人工测量来进行精确定位。为保证推进方向的准确可靠,拟每天进行人工测量,以校核自动导向系统的测量数据并复核盾构机的位置、姿态,确保盾构掘进方向的正确。

(2) 采用分区操作盾构机推进油缸控制盾构掘进姿态

根据线路条件所做的分段轴线拟合控制计划、导向系统反映的盾构姿态信息,结合隧道地层情况,通过分区操作盾构机的推进油缸来控制掘进方向。具体操作原则如下:

a) 如果盾构滚角过大,则通过反转刀盘来减小滚角值。

b) 如果盾构机水平向右偏,则提高右侧分区的千斤顶压力,反之,则提高左侧分区的千斤顶压力;如果盾构机竖直下偏,则提高下部千斤顶压力,反之依然。

(3) 盾构机竖直姿态控制

a) 一般情况下,盾构机的竖直偏差宜控制在 $\pm 20\text{ mm}$ 以内,倾角可控制在 $\pm 5\text{ mm/m}$ 以内。特殊情况下,倾角亦不宜超过 $\pm 10\text{ mm/m}$ ,否则会因盾构机转弯过急引起盾尾间隙过小和管片的错台及破裂等问题。

b) 当盾构机土体上软下硬时,为防止盾构机机头偏上,盾构机则适当保持下俯姿态。

c) 操作盾构机时,注意上部千斤顶和下部千斤顶的行程差,两者不能相差过大,一般控制在 $\pm 20\text{ mm}$ 内,特殊情况下也不能超过 $60\text{ mm}$ 。

(4) 盾构机水平姿态的控制

a) 在直线段,盾构机的水平轴线偏差控制在 $\pm 20\text{ mm}$ 以内,水平偏角控制在 $\pm 3\text{ mm/m}$ 以内,否则会因盾构机急转引起盾尾间隙过小和管片的错台及破裂等问题。

b) 在圆曲线段,盾构机的水平偏差应控制在 $\pm 30\text{ mm}$ 以内,水平偏角应控制在 $\pm 5\text{ mm/m}$ 内,曲线半径越小控制难度越大。

c) 当开挖面内的地层左右软硬相差很大且在

曲线段时,盾构机的方向控制将比较困难,此时可降低掘进速度,合理调节跟分区的千斤顶压力,必要时可将水平偏角放宽到 $\pm 10\text{ mm/m}$ ,以加大盾构机的调整力度。

(5) 盾构机脱离始发台前的姿态控制

在盾构机脱离始发台前,盾构机的方向受始发架的限制,沿始发台的方向直线掘进,主要注意盾构的旋转及保证各组推力油缸的推力平衡。

## 7.2 盾构始发过程姿态控制

(1) 在切换刀盘转动方向时,保留适当的时间间隔,切换速度不宜过快,切换速度过快可能造成管片受力状态突变,而使管片损坏。

(2) 根据掌子面地层情况应及时调整掘进参数,调整掘进方向时设置警戒值与限制值。达到警戒值时就应该实行纠偏程序。

(3) 蛇行修正及纠偏时缓慢进行,如修正过程过急,蛇行反而更加明显。在直线推进的情况下,选取盾构当前所在位置点与设计线上远方的一点作一直线,然后再以这条线为新的基准进行线形管理。在曲线推进的情况下,使盾构当前所在位置点与远方点的连线同设计曲线相切。

(4) 推进油缸油压的调整不宜过快、过大,否则可谢能造成管片局部破损甚至开裂。

(5) 正确选择管片封顶块的拼装位置,确保拼装质量与精度,以使管片端面尽可能与计划的掘进方向垂直。

(6) 做好施工记录。

## 8 地表沉降监测

### 8.1 高程控制网的布设

为取得基准数据,各观测点在施工前,随施工进度及时设置,并及时测得初始值,观测次数不少于2次,直至稳定后作为动态观测的初始测值。

测量基准点在施工前埋设,经观测确定其已稳定时方才投入使用。稳定标准为间隔一周的2次观测值不超过2倍观测点精度。基准点不少于3个,并设在施工影响范围外。监测期间定期联测以检验其稳定性。并采用有效保护措施,保证其在整个监测期间的正常使用。

### 8.2 监测点布设

在盾构隧道加固端头分别布设2个监测断面;盾构始发段、接收段100 m范围内隧道轴线每5 m布设1个监测点,每10 m布设一横向断面,且断面监测点数量不少于9个;其余区段隧道轴线每

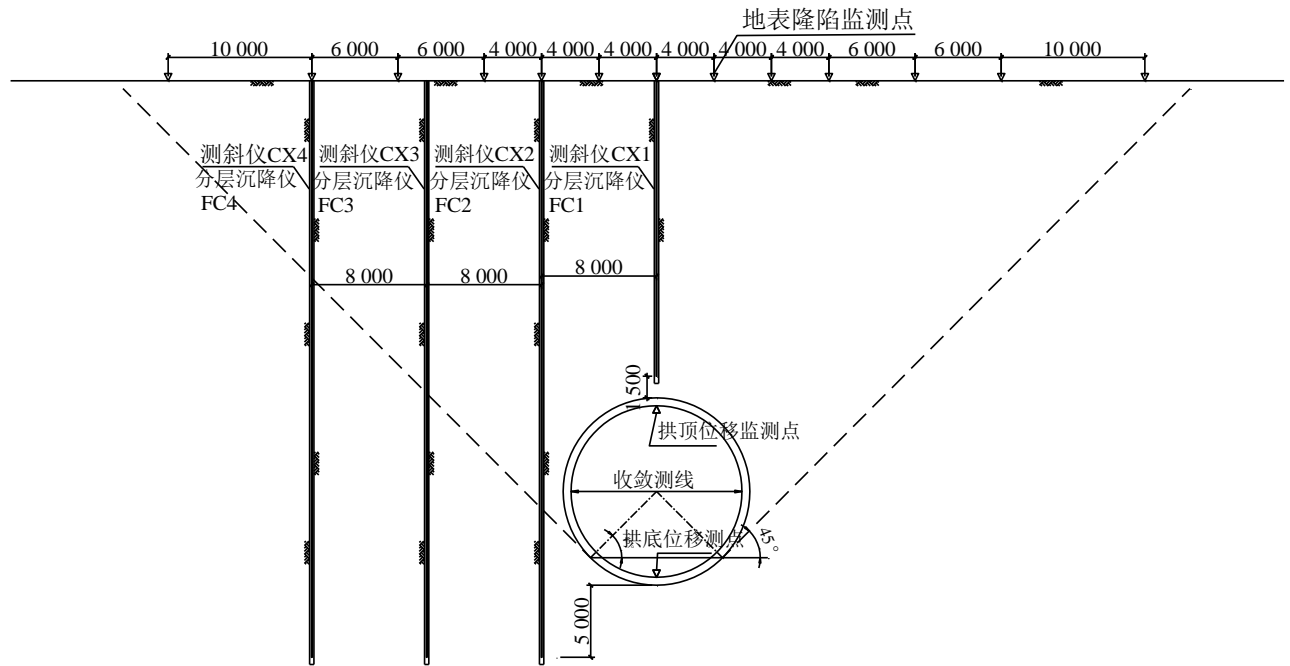


图 12 盾构段地表沉降监测点布设示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the layout of monitoring points for ground settlement in shield interval

10 m 布设 1 个监测点, 每 30 m 布设一横向断面, 且监测点数量不少于 9 个, 横断面方向测点区域以隧道底板的埋深以中线  $45^\circ$  向上扩散, 详见图 12。

## 9 结 语

结合杭州某隧道工程, 介绍了大直径盾构超浅埋软土地层始发的施工技术, 重点分析了隧址地层的岩土特性、水文情况、周边环境, 剖析了本工程大直径盾构超浅埋软土地层始发的重难点, 提出了端头加固、端头降水、始发纵坡控制、始发段注浆、盾构始发姿态控制、沉降监测等施工技术措施; 对同类型工况条件盾构始发具有一定借鉴意义。

## 参考文献

- [1] (日)土木学会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟. 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [2] 朱伟, 闵凡路, 钟小春. 泥水加压盾构泥浆和泥膜[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [3] 李广信. 岩土工程 50 讲[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [4] 沈碧辉, 侯永茂, 马元, 等. 软土地层浅覆土大直径盾构施工参数分析[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 91-94.  
SHEN Bi-hui, HOU Yong-mao, MA Yuan, et al. Analysis on construction parameters of large diameter shield under shallow overburden condition in soft clay[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2019, 1(1): 91-94.