

# 盾构穿越承压含水地层施工技术研究

陈铭辉, 王 坚, 梁 捷

(上海宏波工程咨询管理有限公司, 上海市 201707)

**摘 要:** 针对上海轨道交通 18 号线丹阳路站~昌邑路站区间隧道在承压含水地层中盾构掘进出现的管片上浮, 造成管片碎裂、管片渗漏等问题进行了分析, 提出了解决上述问题的技术措施和方法, 可以为在承压含水地层中盾构掘进提供一定的借鉴和经验。

**关键词:** 盾构; 承压含水层; 管片上浮; 管片碎裂

**中图分类号:** U455.43

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2021)09-0153-04

## 0 引 言

上海轨道交通 18 号线丹阳路站~昌邑路站区间隧道需下穿黄浦江及两岸防汛墙, 隧道基本位于上海地区第一承压含水地层中。该盾构区间<sup>[1]</sup>地层具有含水量高、流塑性大、水稳性差、强度低、透水性强、压缩性低、压缩过程快、抗剪强度高特点, 盾构施工会出现管片上浮、碎裂、渗漏等严重问题。盾构施工期间, 通过采取可靠的技术质量保障措施, 能够很好地控制盾构在承压含水地层中发生的施工问题, 进而提高了区间隧道管片的拼装质量, 有效地控制了管片上浮, 确保了区间隧道的轴线符合设计要求, 降低了施工风险, 规避了损失。

## 1 丹阳路站~昌邑路站区间工程概况

上海轨道交通 18 号线丹阳路站~昌邑路站区间上行线隧道长度 1 257.134 m, 下行线隧道长度 1 257.555 m, 设置 2 处联络通道。该隧道纵向为“V”字形坡, 最大的纵向坡度为 28‰。隧道的最小和最大埋深分别为 17.9 m 和 32.3 m, 最小平面曲线半径为 629.851 m。工程施工筹划见图 1。

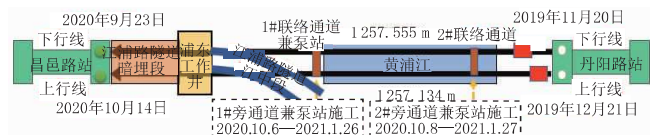


图 1 工程施工筹划示意图

丹阳路站~昌邑路站区间采用两台中交天和  $\Phi 6\ 830$  盾构机, 单台盾构机重 342 t, 盾构机采用内

置式注浆管 8 根(4 用 4 备)。盾构机依次从丹阳路站南端头井始发, 推进至昌邑路站北端头井接收。

## 2 工程水文地质

### 2.1 工程地质

丹阳路站~昌邑路站区间盾构穿越地层包括: ④、⑤<sub>11</sub>、⑤<sub>12</sub>、⑤<sub>2a</sub>、⑤<sub>31b</sub>、⑥、⑦<sub>11</sub>、⑦<sub>12</sub> 层。盾构施工注意以下事项:

(1) 盾构在 ④、⑤<sub>11</sub>、⑤<sub>12</sub>、⑤<sub>31b</sub> 等黏性土层掘进时, 因土体结构受扰动后极易被破坏, 使土体强度急剧下降、变形骤然增加, 会出现掌子面失稳。同时, 盾构在掘进过程中, 土体也会出现一定的回弹。其中, 由于 ④、⑤<sub>11</sub> 土层含水量高、孔隙比大、强度低、压缩性高, 且具有明显的触变、流变特性。因此, 盾构在掘进施工过程中更应加强施工速率的控制, 避免盾构施工对土层造成过大的扰动, 从而减少盾构推进施工后的沉降。另外, 还应注意隧道底部软黏土在运营阶段的次固结沉降影响。

(2) 区间局部穿越 ⑥ 层层顶, ⑥ 层可塑~硬塑的黏土具有较高的强度, 对盾构推进会产生较大的阻力。当盾构推进施工穿越强度不均匀的地层(如 ④ 与 ⑤<sub>11</sub>、⑤<sub>11</sub> 与 ⑤<sub>12</sub>、⑤<sub>12</sub> 与 ⑥、⑥ 与 ⑦<sub>11</sub> 等层交界处)时, 会引起盾构掘进开挖面不稳定, 易造成盾构在线路方向上的偏离。

(3) ⑤<sub>2a</sub> 为微承压含水层, ⑦ 层(⑦<sub>11</sub>、⑦<sub>12</sub> 和 ⑦<sub>2</sub>) 为承压含水层, 在一定的动水压力作用下, 易发生流砂或管涌等不良地质。

### 2.2 水文地质

本工程拟建施工场地浅部土层中的地下水类型为潜水。勘测期间测得潜水的稳定水位埋深为 0.60~

收稿日期: 2021-01-29

作者简介: 陈铭辉(1978—), 男, 高级工程师, 从事建设监理工作。

2.70 m(绝对标高为 2.13~4.11 m),平均埋深为 1.26 m(平均标高为 3.04 m)。潜水的水位主要受地表径流和大气降水等影响,呈幅度不等的变化。根据《岩土工程勘察规范》,上海地区潜水位埋深为 0.30~1.50 m,常年平均地下水位埋深为 0.50~0.70 m。根据上海地区经验,建议地下水高水位和低水位埋深分别取 0.5 m 和 1.5 m。

经勘察,拟建工程场地揭示有⑤<sub>2a</sub>层和⑦层(含⑦<sub>11</sub>、⑦<sub>12</sub>和⑦<sub>2</sub>)(微)承压含水层。⑤<sub>2a</sub>层为上海地区微承压水含水层,场区内揭示的顶板埋深为 19.20~25.40 m,顶板标高为 -15.29~-21.61 m;⑦层为上海地区的第一承压含水层,场区内揭示的⑦层顶板的埋深为 15.20~39.50 m,顶板标高为 -23.28~-35.73 m。鉴于⑤<sub>2a</sub>层与⑦层之间的第⑤<sub>31b</sub>层层厚较薄(其最小厚度仅 0.7 m),且该层夹薄层粉性土,故微承压水与承压水之间可能存在一定的水力联系。据上海区域观测资料,上海地区(微)承压水的水位随季节呈幅度不等的周期性变化,水位埋深一般为 3~12 m。

3 区间结构设计

本区间隧道工程采用预制装配式钢筋混凝土管片,管片内、外直径分别为  $\Phi 5.9\text{ m}$  和  $\Phi 6.6\text{ m}$ ,管片的厚度和宽度分别为 350 mm、1 200 mm,管片采用通缝拼装。衬砌管片的设计强度为 C55,抗渗等级为 P10、P12,由拱底块(D)、标准块(B1 和 B2)、邻接块(L1 和 L2)、封顶块(XF)组成。本区间隧道纵缝和环缝采用 M30 双头螺栓连接,环向共设 12 个螺栓,纵向共设 17 个螺栓,封顶块的拼装方法为纵向插入法。衬砌接缝防水采用三元乙丙橡胶制成的弹性密封垫和遇水膨胀橡胶。隧道贯通后,衬砌内弧面按设计要求作嵌缝、抹孔等防水处理。

4 承压含水地层盾构掘进时引起的不良情况

盾构在承压含水地层中掘进施工(详见图 2),主要由于管片上浮引起隧道衬砌成型管片脱出盾尾后产生隧道的整体上偏使轴线超限、管片碎裂、盾尾渗漏等问题,对隧道施工质量产生不良影响。其中,管片碎裂和盾尾渗漏的问题如果不加以重视,将会导致严重的生产安全事故,造成无法估量的损失。

以丹阳路站~昌邑路站上行线 95~145 环为例,盾构主要施工参数如下:推进土压力 0.33~0.37 MPa,推力 1 600~2 100 t,刀盘扭矩 220~300 t·m,推进速

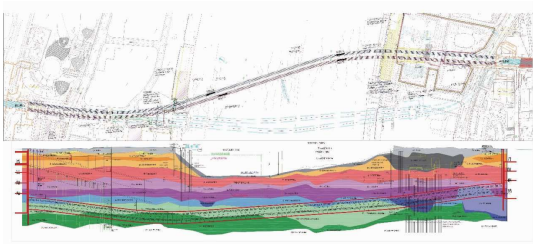


图 2 工程平面和纵剖面

度 35~45 mm/min,同步注浆量 5.0 m<sup>3</sup>/环,盾构隧道竖曲线处于 2.8%大纵坡下坡阶段。成型隧道管片上浮主要表现为:管片脱出盾尾后 1 d 内的上浮量约为 60 mm(最大上浮量为 123 mm),其后管片上浮的速率明显减缓,3 d 后管片基本趋于稳定。具体数据详见表 1。

表 1 上行线 95~145 环管片上浮量统计

| 环号  | 高偏 | 盾尾高偏 | 管底隆起量 |
|-----|----|------|-------|
| 95  | 63 | 17   | 46    |
| 100 | 65 | 10   | 55    |
| 105 | 62 | 2    | 60    |
| 110 | 69 | -2   | 71    |
| 115 | 62 | 6    | 56    |
| 120 | 65 | 0    | 65    |
| 121 | 70 | 5    | 65    |
| 122 | 68 | -19  | 87    |
| 123 | 66 | 5    | 61    |
| 124 | 63 | 5    | 58    |
| 125 | 64 | -3   | 67    |
| 126 | 69 | -21  | 90    |
| 127 | 74 | 2    | 72    |
| 128 | 77 | -1   | 78    |
| 129 | 80 | -7   | 87    |
| 130 | 75 | -27  | 102   |
| 131 | 75 | -7   | 82    |
| 132 | 80 | -29  | 109   |
| 133 | 78 | -10  | 88    |
| 134 | 85 | -29  | 114   |
| 135 | 93 | -30  | 123   |
| 136 | 90 | -15  | 105   |
| 137 | 85 | -30  | 115   |
| 138 | 82 | -33  | 115   |
| 139 | 78 | -35  | 113   |
| 140 | 76 | -17  | 93    |
| 141 | 71 | -20  | 91    |
| 142 | 68 | -20  | 88    |
| 143 | 56 | -12  | 68    |
| 144 | 49 | -20  | 69    |
| 145 | 40 | -20  | 60    |

该段区间土层位于⑤<sub>12</sub>灰色粉质黏土、⑤<sub>2a</sub>灰色砂质粉土、⑤<sub>31b</sub>灰色粉质黏土、⑥暗绿~草黄色黏土、⑦<sub>11</sub>草黄色黏质粉土夹粉质黏土、⑦<sub>12</sub>草黄色砂

质粉土。其中,⑦层为上海地区的第一承压含水地层。最大覆土深度(位于浦东防汛墙位置)约为33.5 m,隧道至河床最小竖向净距15.3 m。黏质粉土夹粉质黏土和砂质粉土这两种土层具有流塑性大、水稳性差、强度低、透水性强、压缩性低、压缩过程快、抗剪强度高等特性。该土层中成型隧道管片的上浮会致使隧道发生纵向的变形,以环缝处最明显。加之目前管片上浮和碎裂处位于盾构机掘进左拐弯段,左右两侧管片所受应力不均等,受土层特性影响,右侧管片受拉力更大,致使右侧管片螺栓受弯曲变形比左侧更明显。所以,管片上浮后,右侧管片碎裂情况比左侧严重。

## 5 管片上浮碎裂原因分析

盾构在承压含水地层掘进施工中产生的管片碎裂主要表现为:在盾尾拼装区内的2环管片基本不会发生碎裂情况,而脱出盾尾的管片会出现连续性碎裂的情况。前期管片发生破损的部位主要位于封顶块(XF块)管片两侧的纵向部位,即相邻L块(邻接块)管片纵缝处,多发生在纵缝靠近盾构掘进方向一侧,碎裂深度一般在50~100 mm,长度在500~1 100 mm,有混凝土碎片脱落现象。后期由于管片上浮,两侧B块(标准块)管片也会出现不同程度的裂缝,发生位置与L块类似。以上破损由以下几方面造成:

### (1)盾构机非故障性停机的影响

盾构施工过程往往出现渣土无法正常外运、管片供应不及时的情况,因此造成盾构出现停机现象。当盾构恢复正常推进施工时,因刀盘切口处和土仓内渣土沉积,使得盾构刀盘复转时扭矩增大,盾尾液压装置对已成型管片形成的扭力发生变化,使成型管片出现破损碎裂的情况。另外,停机时间过长,会使盾构机整体有明显下沉现象;盾构机的姿态调整难度增加,也会造成管片破损碎裂。

### (2)盾构机设备自身的影响

丹阳路站~昌邑路站区间盾构机需切削江浦路隧道浦东工作井地下连续墙,因此,盾构机设备选型为中交天和复合式土压平衡盾构机,并采用内置注浆系统。该盾构机直径较普通外置注浆系统的盾构机直径单边增加35 mm,造成隧道成型后管片外壁与土体的空隙增大,同步注浆浆液理论用量也较普通盾构机有所增大(原盾构机同步注浆理论用量为 $2.0\text{ m}^3$ ,内置注浆系统盾构机同步注浆理论用量为 $3.0\text{ m}^3$ )。

本区间盾构始发后,在浦西段需穿越渔人码头和浦西防汛墙,地面、房屋和防汛墙变形控制要求高,盾构掘进时需采用土压和同步注浆两种措施进行双控。掘进过程中,房屋和防汛墙总体沉降控制较好,地层损失率基本控制在 $\pm 3\%$ 以内。而同步注浆量普遍在 $5\text{ m}^3$ 以上,最大值为 $5.2\text{ m}^3$ ,实际的同步注浆量达到理论注浆量的180%。同步注浆量增大造成管片上浮情况严重,平均上浮量近80 mm,最大上浮量达123 mm(管片上浮量统计详见图3),导致盾尾上部间隙较小(仅10 mm),且盾构机竖曲线位于 $+2\%\sim -28\%$ 的下坡变坡当中,容易导致顶部管片破碎。

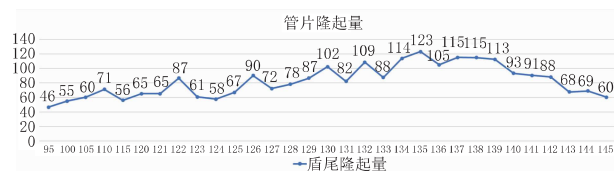


图3 管片上浮量统计

管片上浮量较大,使得管片环间上浮量差异较大(最大差异达20 mm左右),造成隧道管片间十字错缝情况严重,容易导致隧道腰部位置的管片碎裂。

### (3)同步注浆浆液质量的影响

同步注浆孔位和注浆量的分配不合理,造成注浆不均匀,底部注浆过多、过快也会造成管片上浮。施工前期,同步注浆浆液性能强度指标不能满足快速固结,未能及时起到固定管片的效果。在掘进速度较快情况下,同步注浆的浆液<sup>[2]</sup>无法及早达到初凝并具有一定的固结强度,且随着掘进速度加快,地层损失空隙中同步注浆的浆液未凝固。由于注浆的压力和浆液的比重较大,故浆液产生了大于管片自重的浮力,使成型管片具有了一定的浮力,成型管片和连接螺栓在浮力的作用下发生弹性形变,不能约束管片上浮。

### (4)盾构掘进超挖的影响

盾构掘进过程中,特别是转弯过程中,也会存在超挖的情况。因此,切口部位的地层损失空隙进一步扩大,从而使管片上浮的可能性进一步增大。

## 6 控制管片上浮碎裂的措施分析

在发现隧道出现成型管片上浮碎裂情况后,项目监理单位立即组织业主和施工单位收集盾构推进相关数据,查阅国内外有关技术资料,并结合以往管控经验,提出了如下解决方案:

(1)为保障盾构连续施工,避免出现盾构机非故

障性停机的情况,增加管片供应和渣土外运能力,提升运输效率,减少盾构机停机时间。

(2)盾构机推进过程中,在保持扭矩不变的前提下放缓推进速度,时刻注意盾尾间隙变化情况。一旦发现盾尾间隙有缩小的趋势,立即通过各千斤顶推力的调整控制盾尾的间隙。

(3)调整盾构机4个同步注浆孔的注浆比例,将原来的上、下注浆孔按5:5的注浆比例调整为6.5:3.5,甚至调整为7:3,使浆液均匀合理填充密实。在调整注浆比例的同时改进浆液配比,在满足泵送的情况下降低同步注浆坍落度。另外,适当加入促进浆液提前凝固的胶凝材料,提高浆液初凝时间和强度(3 d 0.3 MPa)及浆液比重(1.8~1.9 g/cm<sup>3</sup>),提高浆液初期抗剪强度,减小管片上浮量,保证地层损失率的情况下将平均上浮量控制在4 cm。

在1#台车上部搭设注浆平台,对上部管片每10环进行1道三环宽的上部180°双液浆环箍注浆(详见图4),双液浆配比为1:3(水泥浆500 L,水玻璃160 L),每环每孔注浆量为0.2 m<sup>3</sup>,减小相邻环间浆液的流动,固化隧道顶部土体。

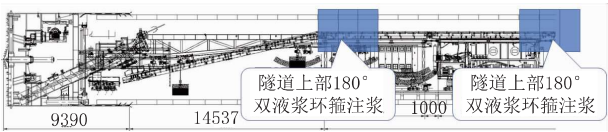


图4 管片上部180°双液浆环箍注浆

(4)经实测数据得知,管片脱出盾尾后至车架段的成型隧道呈阶梯式上浮趋势,之后数据趋于稳定。针对上浮情况,对盾构机盾壳内外连续5环管片底部180°部位采用型钢纵向拉接装置对成型隧道进行固定(详见图5),提高管片间的整体抗剪能力,减小隧道变形。同时增加12 t的配重,为浆液固结争取时间,减小管片上浮量。



图5 型钢拉结固定管片

(5)丹阳路站~昌邑路站区间将穿越⑤<sub>2a</sub>灰色砂质粉土、⑥暗绿~草黄色粉质黏土、⑦<sub>11</sub>草黄色黏质粉土夹粉质黏土和⑦<sub>12</sub>草黄色砂质粉土等复杂土层。盾构掘进每环进行渣土留样,及时掌握每环土层变

化情况。同时,根据变化情况,考虑进行渣土改良等措施,确保开挖面稳定。

(6)对每环管片底和管片顶的上浮数据进行实时测量监测,掌握管片脱出盾尾~车架段的上浮情况。建立每日数据分析会制度,每个班组作业结束后和下一个班组作业开始前,由项目工程师牵头召集技术员、盾构机长和盾构司机等相关人员参加例会。盾构司机汇报当班推进情况,结合项目工程师的当日数据分析,根据当日数据及监测情况,确定下个推进班的盾构施工参数,由盾构机长下达下个推进班的盾构施工指令,做到精细化施工。

上述处理措施提出后,项目监理单位立即督促施工单位按照要求实施。经过对丹阳路站~昌邑路站上行线325~335环的管片上浮规律观测,管片上浮累计变形量最大值由原来的123 mm下降到15~30 mm,具体数据详见表2。由此可以看出,该处理措施有效地控制了管片上浮,减少了管片碎裂、渗漏,保证了盾构隧道施工质量能满足设计和规范<sup>[3]</sup>要求。

表2 上行线325~335环管片上浮量统计

| 环号  | 高偏  | 盾尾高偏 | 管底隆起量 |
|-----|-----|------|-------|
| 325 | -7  | -34  | 27    |
| 326 | -10 | -35  | 25    |
| 327 | -9  | -37  | 28    |
| 328 | -12 | -39  | 27    |
| 329 | -19 | -40  | 21    |
| 330 | -19 | -41  | 22    |
| 331 | -17 | -41  | 24    |
| 332 | -14 | -36  | 22    |
| 333 | -13 | -32  | 19    |
| 334 | -7  | -30  | 23    |
| 335 | -5  | -25  | 20    |

7 结 语

综上所述,在承压(微承压)含水地层中进行盾构掘进时,常会出现管片上浮、管片碎裂、管片渗漏等现象。为了控制隧道管片上浮等问题的发生,在施工过程中,应做好以下控制工作:

(1)应确保盾构连续施工,不能随意出现停止盾构掘进的情况发生。

(2)管片上浮问题是同步注浆稳定管片与管片上浮在时间上的赛跑,因此,应调整好同步注浆浆液性能指标,控制好各同步注浆孔浆液注入比例、注浆量和注浆压。

(下转第163页)

减速带、减速牌等来提示驾驶员控制车速。

### 3.3.2 车辆侧滑危险性分析

道路沿线的侧滑安全系数  $K_s$  模拟结果如图 4 所示。

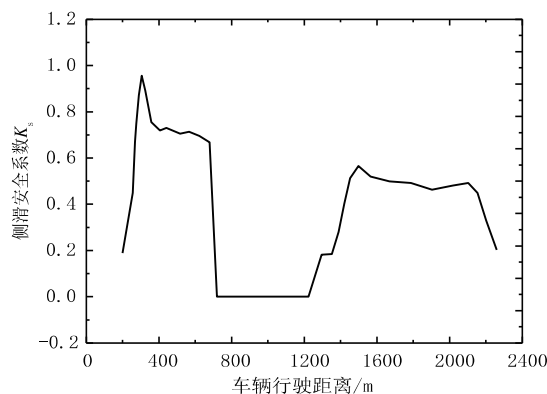


图 4 各路段侧滑安全系数曲线图

图 4 表明:车辆以时速 80 km/h 行驶时,沿线的侧滑安全系数均小于 1,基本不会发生侧滑现象。但是,在 K10+850 路段附近,车速以快速驶入弯道,车辆侧倾力增加,侧滑安全系数迅速变大( $K_s \approx 1$ ),此时车辆处于侧滑的临界状态,驾驶员应及时控制车速,确保行车安全。

## 4 结 语

经探讨道路平面线形和纵断面现线形的影响,并利用车辆仿真实验,评价车辆行驶的安全性,主要得出以下结论:

(1)道路直线和圆曲线对车辆行驶的影响主要

体现在驾驶员视觉反应、心理承受能力、行车速度等方面,圆曲线对道路交通安全的影响要大于直线段。

(2)道路的纵坡坡度和坡长应满足规范要求,否则会干扰车辆爬坡能力、制动效果、行驶平顺性等。

(3)人—车—路综合仿真模型可靠度满足要求,能反映道路线形与车辆之间的相互作用。

(4)车速变化系数和侧滑安全系数会随着道路线形不断变化。当  $K_v$  和  $K_s$  取值接近 1,车辆行驶安全性处于临界状态,驾驶员应加强车辆速度控制。

### 参考文献:

- [1] 孙悦. 海绵型道路关键几何设计参数优化及雨天行车安全研究[D]. 广州:东南大学,2019.
- [2] 符铎砂,葛婷,李海峰,龙立敦,王晓飞.基于公路三维线形几何特性的行车安全分析[J].中国公路学报,2015,28(9):24-29.
- [3] 谢瑶. 道路几何设计对行车舒适性的影响与改善方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [4] 杨挺. 道路线形因素对交通安全的影响分析[D].西安:长安大学,2017.
- [5] 徐进,邵毅明,杨奎,罗晓,罗庆.基于人—车—路协同仿真的山区道路大型车辆行驶适应性分析[J].中国公路学报,2015,28(2):14-25.
- [6] 王慧丽,史忠科.基于 GPS/IMU 的山区道路参数拟合与行车安全分析[J].中国公路学报,2014,27(6):27-33.
- [7] 白钢. 基于车辆行驶稳定性仿真的道路几何线形设计参数研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [8] 王栋梁.道路几何线形与速度的相关性分析[J].交通世界(运输·车辆),2008(8):124-125.

(上接第 156 页)

(3)应在成型隧道管片上做好拉结和配重,确保成型隧道的质量。

(4)应调整千斤顶的推力,确保管片均匀受压。

(5)应调整盾构姿态、控制盾尾间隙,减少盾构蛇形超挖。

### 参考文献:

- [1] 沈冬强. 地铁盾构全断面淤泥质粉质黏土层掘进施工的技术研究[J].城市道桥与防洪,2020,254(6):175-177.
- [2] 王旋东. 砂性土层盾构隧道管片上浮因素分析及控制技术[J].上海建设科技,2020(2):36-38.
- [3] GB 50446—2017,盾构法隧道施工及验收规范[S].