

浅析盾构下穿液化土地层的施工措施

仇坤坤

北京城建中南土木工程集团有限公司 北京 100020

DOI:10.12238/etd.v3i4.5258

摘要：发展轨道交通已成为大中型城市缓解交通压力的首选途径，而盾构法施工技术在轨道交通建设实施过程中所占比例较大，在盾构法施工过程中又不可避免地遇到不同的地质工程环境。在长三角采用盾构法施工时，由于工程地质和地下水位等因素，不可避免地遇到液化土地层，液化土地层多为粉细砂和淤泥质土，且含水丰富，在盾构掘进过程中不可避免地会产生地层扰动而带来地层的不稳定，造成地表沉降超限和隧道位移等；以及在掘进过程中地下水在刀盘前方的汇聚造成渣土成流体状（含水高达 60%以上），造成渣土外运困难。结合南通轨道交通 1 号线某标段液化土地层盾构掘进的工程实践，制定、落实了相关应对措施，为类似盾构施工项目提供一定的参考。

关键词：盾构；液化地层；掘进；土体改良；对策

中图分类号：TU722 **文献标识码：**A

Construction Measures of Liquefaction Land Layer under Shield Tunneling

Kunkun Qiu

Beijing Urban Construction Zhongnan Civil Engineering Group Co., Ltd. Beijing 100020

Abstract: The development of rail transit has become the preferred way for large and medium-sized cities to relieve traffic pressure, and shield construction technology accounts for a large proportion in the implementation process of rail transit construction, and inevitably in the process of shield construction. During the shield construction in the Yangtze River Delta, due to engineering geology and groundwater level, mostly silt, silt and rich in water, causing unstable strata, surface subsidence and tunnel displacement, and the convergence of groundwater in front of the cutter (high 60%), causing difficult waste transportation. Combined with the engineering practice of liquefied land layer shield tunneling in a certain section of Nantong Rail Transit Line 1, this paper formulates and implements relevant countermeasures to provide certain reference for similar shield construction projects.

Keywords: Shield; Liquefied formation; Excavation; Soil improvement; Countermeasures

1 工程概况

南通轨道交通 1 号线某标段区间采用盾构法施工，在区间 602 环~894 环之间隧道顶部上 1 倍隧道直径范围内为③1a 层（液化层）；此段隧道覆土深度 20.71~22.41m，竖曲线位于 6.7‰上坡段，平面为直线段，地面以市政道路和农田、河浜为主。区间的地下水类型主要为潜水及第 I 层承压水，地表水与潜水水力联系较为密切，地下水埋在地表以下 0.5m。根据标贯液化指标判别，③1a 层为液化土，液化土指数 7.85~17.85，平均液化指数 9.5，属于中等液化场地。当进行隧道在粉性土、砂土层中掘进时，如施工措施不当，可能产生渗流液化情况。

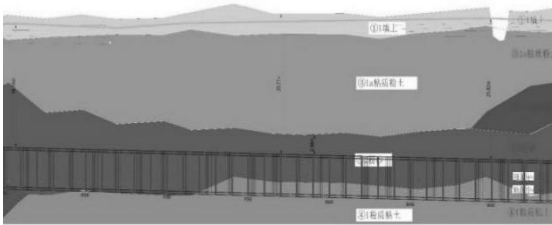


图 1 液化段地质剖面图

2 试掘进参数及措施

表 1 拟定掘进施工参数

土压 (Bar)	盾构推力 (10kN)	刀盘扭矩 (kN · m)	出土 量(m³)	掘进 速度 (mm/ min)	注浆压 力 (MPa)	注浆 量(m ³)
2.0~2.2	1500~2000	1500~2500	39~41	40~50	0.23~0.36	>5.7

2.1 掘进速度

根据长三角区软土地层掘进经验，和业内相关指导标准，在初期试掘进阶段，结合富水砂层掘进、隧道埋深大、砂层收敛快的特性，将掘进速度控制在 40~50mm/min 左右。

2.2 壁后注浆

同步壁后注浆的注入量受盾构掘进断面土体的渗透性、孔隙比、区间掘进纵断面的坡度、土方超挖和欠挖、注浆所用的原材和配合比、地下水、以及掘进速度和注浆时间等多方面因素的影响。砂浆的注入量，根据以上因素综合考虑，在保证有足够的浆液能填充管片与地层之间的理论空隙，选取适当的注入率进行控制。根据南通地铁 2 号线惠~幸区间

砂层的特性及施工工况, 注入率 α 取200%, 控制在 5.7m^3 以上。注浆压力计算值为隧道上部土体重度加及车辆的动荷载影响, 注浆压力孔控制在 $2.0\sim 3.5\text{bar}$ 左右, 注浆顺序由下至上。

根据监测资料反馈信息, 及时进行跟踪二次注浆, 并每间隔5环~8环采用双液浆施作一处环箍, 隔断前后的水力联系。为避免二次注浆浆液击穿盾尾刷, 至少需在管片在脱出盾尾的6环~8环管片后方可进行二次注浆, 注浆顺序由上至下。

2.3 土压力

土仓内土压力的取值, 本区间的地层以细砂层为主, 渗透性较大, 本施工段的土仓上土压计算, 采用水土分算, 土压取值为隧道上方土体的压力, 乘以侧压力系数+水的压力。经计算, 上部土压力取值 $0.22\text{MPa}\sim 0.24\text{MPa}$ 之间。

2.4 土体改良

掘进过程中, 可以利用刀盘上的泡沫孔、膨润土孔和土仓壁上的改良孔, 往向掌子面土体注入膨润土溶液或泡沫剂改良土体, 从而增加渣土的流塑性。

①泡沫改良: 使用国内优质泡沫混合, 原液比例3%, 单路流量控制在 $180\sim 200\text{L/min}$ 。

②膨润土改良: 使用优质膨润土, 建立膨润土搅拌装置, 在地面进行提前搅拌、发酵, 通过膨润土管运至盾构机膨润土浆灌用于渣土改良。

掘进过程中, 发生了渣土局部出现液化, 螺旋机出现轻微喷涌, 渣土含水高、成流体状等现象, 同时地表日沉降速率也增大, 累计沉降也增大, 增大了工程的风险。

3 原因分析

(1) 本区段隧道顶部地层为液化层, 在掘进状态下对液化层产生的扰动, 由于液化层为水饱和和地层, 在产生扰动的情况下形成水土分离状, 大量的水向刀盘前方汇集, 同时一环的掘进时间加长, 扰动的的时间加长, 刀盘前方的汇集的水量就会相应增加, 以致于喷涌, 和渣土呈流体状态。

(2) 由于掘进速度慢, 每环产生的扰动时间增加, 隧道上方的不稳定的液化层变形量增大, 同时将液化地层变位移状态快速地传递到地表, 引起地表的沉降加速。

4 优化施工措施

4.1 掘进参数优化及土压稳定维持的增强措施

(1) 此段盾构掘进断面为富水粉砂夹粉土层

地层稳定性差, 透水好, 在掘进过程中需对土压力和渣土改料模式进行调整。减少地层的扰动可通过提升掘进速度和调整刀盘转速(增加掘进速度和降低刀盘转速可减少地层被扰动时间); 地层地下水丰富可通过改良系统增加泡沫气体的压入量, 建立气压模式, 把进入土仓的水压入地层前方, 使地层的水不能快速地从刀盘处汇集到土仓; 土压力取值在水土分算的理论计算出来的静止土压力基础上, 增加 $0.1\text{bar}\sim 0.2\text{bar}$, 使盾构掘进时, 地表有轻微隆起, 以抵消盾构穿越后的地面局部沉降, 并结合土仓的含土量和地表沉降

值综合考虑, 进而确定合理的土压力设定值。

(2) 主要参数设置

刀盘转速: 刀盘转速 1.0r/min , 掘进速度增加至 $65\sim 75\text{mm/min}$; 土仓上部土压约 $2.3\text{bar}\sim 0.24\text{bar}$, 螺旋机转速 $8\sim 10\text{r/min}$ (螺旋机转速根必须与土仓压力和掘进速度匹配); 刀盘扭矩: $1500\text{KN}\cdot\text{m}\sim 2500\text{KN}\cdot\text{m}$; 渣土改良: 调整泡沫原液、水、空气的比例, 使泡沫产生最佳效果, 根据需求适量增加空气量, 通过空气的压力减少刀盘前方及隧道后方地层水向土仓汇入。

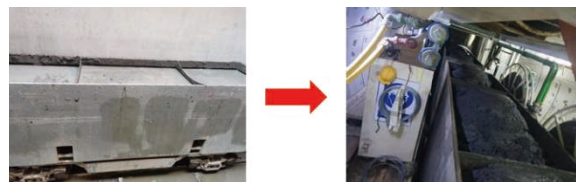


图2 掘进速度由 $40\sim 50\text{mm/min}$ 提升至 $65\sim 75\text{mm/min}$ 的渣土变化图

(3) 维持土压稳定的增强措施

在盾构持续掘进过程中, 根据刀盘的开挖量和螺旋机的排土量能维持一个稳定土压动态平衡, 当掘进完成后, 处于管片拼装期间, 土仓土压会随着停止掘进的时间增加, 土压力会减小, 当土仓被动土压力小于刀盘前方地层主动压力时, 刀盘前方的泥土就会涌向土仓, 造成地层就会失稳; 同样刀盘的开挖直接大于盾体直径, 当停止掘进时间增加, 盾体与刀盘开挖的间隙平衡压力就会随着时间的增长而破坏, 同样导致盾体上方的地层失稳。

为解决盾构机停止掘进期间土仓压力减小和消散带来地层不稳的影响, 在盾构机掘进停止期间, 通过盾体径向孔和刀盘的改良剂注入孔, 注入发酵良好的浓稠的膨润土浆液来维持地层的稳定。

4.2 排土量的管理

在掘进过程中螺旋机的转速一定要匹配盾构机的掘进速度, 维持好土仓压力的正常波动。盾构掘进的速度越快即贯入度约大, 相同时间内刀盘切削的土体就越多, 土仓内的渣土就会增多, 如果螺旋排土不及时, 土仓压力即会上升; 相反土压即会下降。充分合理利用螺旋输送机来实时的调节土压力, 使其控制在一个稳定合理的转速, 确保螺旋匀速排土。使土压力控制在目标范围值之内, 将每环出土量控制细(以千斤顶行程管理出土量), 禁止出现渣土超排。

保证泡沫添加系统管路疏通, 并根据刀盘扭矩和掘进速度与总推力的关系, 调整合理的泡沫最佳配比, 再进行注入掘进。

严格按照千斤顶行程管理渣土排出量, 即装满一个土箱(18m^3)对应千斤顶行程约 $457\sim 474\text{mm}$, 严禁超排, 同时要检查渣土箱残留渣土量, 以确定千斤顶行程管理的准确性。

掘进出渣量根据参数总结段取得的参数进行控制。出渣量控制可通过推进速度与螺旋输送机转速来实现, 严格控制

出渣量（可通过千斤顶兼顶龙门吊称重或渣土斗设体积刻度线进行监控）。

4.3 注浆管理

当管片脱出盾尾后，管片外弧面与刀盘开挖的空洞存在较大的空隙，此时就需要主动、强制性地对环形空隙进行填充，其措施如下：

1）根据当前地层，为更好地稳定成型隧道和管片周边的秃头，同步注浆浆液使用快硬性水泥砂浆，其初凝时间控制在3~5小时（同时浆液初凝时间，要充分考虑到运输、停滞时间，不宜过短；以免浆液凝结，堵塞注浆管路，影响施工连续性）。

2）同步注浆采用注浆量和注浆压力双向管理方式，注入方量为理论注入量150%左右，注浆压力为2.0bar~2.5bar；避免因注入量和压力过大击穿盾尾刷，与盾尾内部形成通道。在注入的过程要安排专人查看盾尾是否有漏浆现象，如有漏浆，及时停止掘进和注浆，在漏浆部位，集中注入盾尾油脂；同时严禁掘进不注浆、不注入盾尾油脂行为。

3）同步注浆后，由于浆液的收缩，土体之间仍存在空隙，又由于盾构推力，衬砌和土层间会相互分离，二次注浆能有效地进一步充实背衬空隙和提高止水能力。

液化层地段，管片拼装带有预留注浆孔的加强环管片，利用管片的预留注浆孔和管片吊装孔开口后进行补浆，二次补浆采用水泥水玻璃浆液，双液浆的凝结时间为25~30秒。以弥补壁后浆液的填充不实的空隙，减小因同步注浆不饱满产生的沉降。

同时二次补浆不能太靠近盾尾，双液浆凝结速度快，可能导致盾构外壳被箍住，以致无法向前掘进，选择太远的地方，单液浆初凝收缩后会引起地层下沉，根据双液浆初凝速度和盾构施工经验，二次补注浆至少安排在当前拼装管片后至少5环。在二次和多次补浆过程中应安排专人查看补浆处管片的错台、位移变化量，如有变化，立即停止补浆。

4.4 管片拼装管理

管片采用错缝拼装，增强隧道的整体刚性，里面管片局部的应力集中；封顶块拼装时，使用自制卡尺，核实临边快间的空隙是否满足拼装条件；插入封顶块应以不超过管片宽度2/3的位置径向推上，然后再纵向插入。管片拼装时，先拼装底部管片，然后自下而上左右交叉拼装，每环相邻管片应均匀拼装并控制环面平整度和封口尺寸，最后插入封顶块成环。

推进完成后，由盾构操作手应向拼装手交底管片拼装点位及拼装顺序，做到心中有数，将楔形量最大点位拼装于盾尾间隙最小的位置，尽量保证各方向盾尾间隙均匀，避免盾尾和管片相互挤压，造成管片、盾尾刷损坏；白班交接班时，将管片趋势于姿态趋势及前几环的掘进情况做好交接。管片拼装点位选择时，应优先考虑盾尾间隙；同时要求每环管片拼装前、后分别量取上、下、左、右四个点盾尾间隙，并设定警戒值为15mm。

4.5 纠偏管理

掘进过程中，勤量盾尾间隙，结合曲线线性特征，合理选拼管片。严禁出现大量纠偏，左右区域千斤顶行程差超过理论盾尾间隙值（40mm），以防止出现蛇形推进或者“犁地走”的情况。

4.6 盾尾舱的管理

加强盾尾刷保护：盾构机组装时，严格把控盾尾刷连接和手涂油脂质量。管片拼装时，同时松掉的千斤顶不多于1/4，防止盾构支撑力不足产生后退，将盾尾刷损坏。泵送盾尾油脂使用国内知名品牌，该品牌在业界具有较高口碑和品质，其油脂具有粘结性高，泵送性能好，耐击穿能力高等特点，以便更好地保护盾尾刷。

4.7 施工监控、测量、监测

1）地面和隧道实行信息互通，进行施工参数和视频监控，掌握施工动态，同时开通隧道内移动网络，可对台车尾部到拼装区域通过手机视频通话进行施工联系和监控、指导。

2）加强自动导向系统和人工测量的复核，确保盾构掘进姿态误差可控。

3）加密成型隧道姿态位移、变形监测测量。

4）加密地表监测点和增加监测频率。

5）建立反馈机制，根据监测数据及时做出施工调整方案措施。

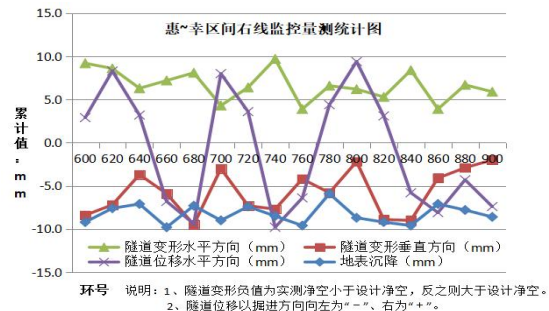


图3 惠幸区间右线监控量测统计图

结束语

上图为南通轨道交通1号线某标段区间，盾构在液化地层掘进施工过程的改进后渣土排放图、隧道变形位移曲线图、地表沉降曲线图。从图可看出，在液化地层盾构掘进施工中，实行掘进参数、改良优化以及出土量、注浆、监控量测的管理措施后，掘进施工正常化、成型位移、地表沉降能得到的控制，满足相关规范要求。其受到工程相关单位的认可，并给予了极高的评价。

参考文献：

- [1] 本立平.轨道工程特殊地段盾构施工技术探讨[J].科技传播(上册),2011(7):31-32.
- [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] 南通地铁1号线一期工程惠民路站~幸余路站区间岩土工程勘察报告[R].2017.11.