

快速路大盾构与地铁隧道并行施工风险管控对策研究

姚海生

上海建通工程建设有限公司

摘要:随着城市规模的不断扩大和运行车辆的日益增多,为缓解地面交通压力,一些发达城市快速路大盾构和地铁隧道并行施工将会越来越普遍。由于多数施工位置地处城市中心区,受地理空间等限制,施工环境十分复杂。本文结合杭州地铁6号线SG6-9标江南大道快速路大盾构与江陵路站-星民站地铁隧道并行施工案例,分析了大盾构在超埋深富水含砂砾层、浅覆土等工况施工,可能会对运营的地铁1号线江陵路站、大隧道自身和并行地铁区间隧道可能产生的风险和交互影响,研究制定了大盾构在并行段施工参数控制标准和有效风险管控措施,顺利地完成了并行段的施工。

关键词:大盾构;隧道;并行施工;风险管控;对策

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.05.048

引言

由于盾构在地下施工,其复杂性、隐蔽性和不可预见的因素多,加上并行施工地质条件差,大盾构隧道断面涉及粉砂层、圆砾土层,在富水含砂层中施工容易造成正面泥水后窜,隧道进洞段为浅覆土,容易引起大隧道上浮,隧道上浮将直接对地铁区间隧道带来不利影响。施工难度大,无疑给施工和管理带来极大的困难和挑战。风险管控的到位与否,直接关系到人民生命、建筑结构和环境安全。因此,做好地下隧道施工风险管控显得尤为重要,并具有极其重要的意义。

一、工程概况与水文地质

(一) 工程概况

地铁江陵路站-星民站为杭州地铁6号线SG6-9标其中的一个区间隧道(以下简称江-星地铁隧道),江陵路站是地铁1号线与6号线的换乘站。区间线路自江陵路站大里程端头井出发至星民站。快速路大盾构隧道内径10360mm、外径11360mm,隧道(832~1130环)与地铁隧道(1~498环)并行,并行长度约597m,水平间距6.6~15m,垂直间距约0~12m。快速路和地铁隧道分别

埋深9.3m~35.3m、9.3m~16.8m。本区间大盾构施工时,并行段地铁隧道已全部完工,处于“跑图”阶段,并行关系见图1-图2。

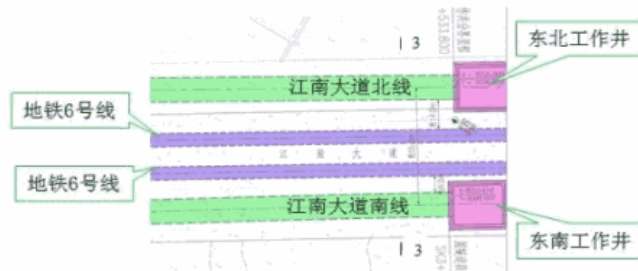


图1 江南大道盾构与江-星地铁隧道并行段平面图

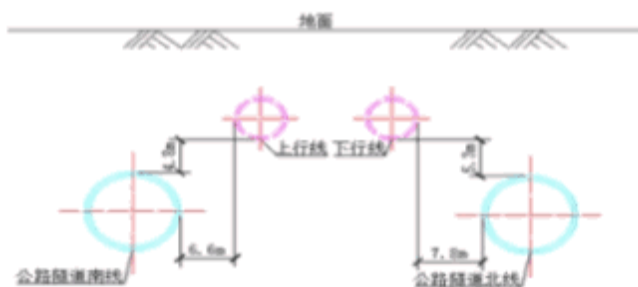


图2 江南大道盾构区间与江-星地铁隧道并行段横剖面图

(二) 并行段周边环境

工程地处杭州市江南大道主干道,盾构隧道沿江南大道敷设,隧道线路周边主要为市政道路、绿化带和既有3~4层多层建筑。道路周边管线较为密集,主要有电力、雨污水、通信、燃气管线等。

(三) 工程地质和水文地质

1. 工程地质

并行段大盾构涉及地层主要为⑥淤泥质粉质黏土、⑧2粉质黏土、⑧3粉砂、⑫1中砂、⑫4圆砾层,地铁隧道涉及地层主要为③4-2砂质粉土、③5砂质粉土夹粉砂、③6粉砂和⑥淤泥质粉质黏土。见图3。

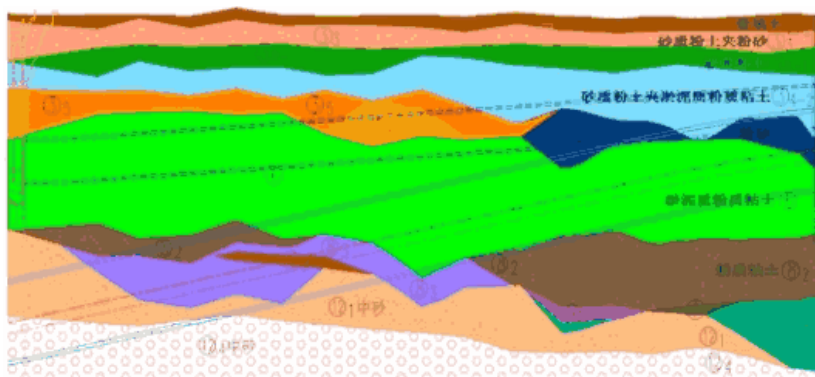


图3 江-星地铁隧道并行段地质剖面图

2. 水文地质

据勘探, 场地地下水类型主要是第四纪松散岩类孔隙水和基岩裂隙水, 孔隙水根据赋存条件又分为孔隙性潜水、孔隙性承压水。其中孔隙承压水分布于场区下部⑧₃粉砂、⑫₁层粉砂和⑫₄层圆砾, 水量丰富, 上部淤泥质土和黏土层⑥、⑧₂层为隔水层; 承压水位呈年周期性变化, 设计时承压水水位应按最不利情况考虑。

二、并行段风险影响分析

快速路盾构掘进过程中与地铁隧道并行距离长, 大盾构隧道掘进涉及超埋深、浅覆土、粉砂、圆砾土层, 工况复杂。风险管控重难点主要有:

1) 大盾构在水量丰富的砂、砾层施工, 容易造成正面泥水后窜, 盾尾密封如失效, 会导致漏泥、漏砂等风险。

2) 盾构在超深埋段需穿越高承压水砂层、圆砾层, 一是盾尾易发生渗漏; 二是盾构机在该区域承受土体压力较大, 若正面泥水压力调节不当, 易使正面土体受到挤压、超挖; 三是长时间在砂、砾层推进刀具易磨损, 需停机换刀, 较长时间停机可能造成隧道沉降、盾构姿态变化等; 四是泥膜建立困难, 当泥水压力设定不当时, 对开挖面土体扰动大容易引起坍塌; 五是排泥不畅, 开挖仓压力波动大。

3) 盾构进洞段最浅覆土为9.3m, 覆土为0.82D, 属于浅覆土。浅覆土易引起隧道上浮, 从而导致并行地铁隧道受大隧道上浮影响而产生较大变形。另外, 盾构进洞断面下部⑥淤泥质粉质黏土, 上部涉及③4-1砂质粉土③4-2砂质粉土夹淤泥质粉质黏土、③5砂质粉土夹粉砂、③6粉砂, 易发生涌砂涌水现象。

4) 地铁隧道与快速路盾构隧道最近水平间距约6.6~15m, 垂直间距约0~12m, 两隧道并行由于距离较近, 交互影响范围广, 可能会造成地铁隧道不同程度的沉降。

5) 江南大道车流量大, 周边商业、住宅众多、地下管线密集, 并行段盾构需穿越给水、污水、雨水、燃气、电力、通讯等诸多管线。大盾构推进过程中其中任何一个环节操控不到位, 对周边土体扰动大可能会引起地层损失等。

总之, 如施工风险控制不当, 大盾构推进过程中将对地铁隧道、大隧道自身造成持续、较大的交互影响和风险。将会导致地铁隧道结构沉降、位移、收敛变形, 当变形量过大时可能引发管片、道床结构裂缝、渗漏水, 甚至导致道床与管片脱开, 进而影响地铁1号线江陵路的正常运营。同时可能造成大隧道自身涌砂涌水、沉降变形以及周边建筑物沉降、管线断裂、地表塌陷等风险。

三、并行段风险管控对策

(一) 施工前风险管控对策

1. 现场踏勘, 理清两隧道相互关系和影响

在大盾构施工前进行实地调查研究, 提前对大盾构并行段的地铁隧道进行检测评定、确认管线位置、埋深等, 弄清快速路盾构隧道和并行地铁隧道之间的相互关

系以及大盾构掘进时对自身和地铁隧道的交互影响。

2. 提前做好风险预判, 对盾构机针对性设计

结合工程地质情况, 对盾构机进行了针对性设计。本工程采用1台P11730MM海瑞克和1台11660MM上海隧道自制泥水平衡盾构机。有以下特点:

1) 便于控制开挖面处于稳定状态。盾构机装配特殊压力装置密封系统, 能满足最大工作压力要求; 泥水调节功能对开挖面进行精确支撑。

2) 能精确控制地表、建(构)筑物沉降。盾构机配有同步注浆系统, 能通过管片上的注浆孔根据沉降情况进行针对性的二次注浆, 可将地表及地铁隧道沉降值控制在最小。

3) 具有较强的轴线控制能力。盾构机配置六组油缸, 推进时可通过调整每一组油缸的不同推进速度对盾构进行纠偏和调向; 配备高精度自动导向系统, 以保证线路方向的正确性和对盾构姿态的灵活调整; 刀盘和进排泥泵、进排泥闸阀、推进油缸分别设有转速传感器、流量计和速度传感器, 所测数据参与盾构掘进控制, 便于及时调整刀盘转速、进排泥流量和推进速度, 保证盾构机具有较强的轴线控制能力。

4) 盾构机密封装置密封性能较好, 盾尾油脂压注点位沿盾尾均匀分布。

5) 刀盘针对性设计。考虑到盾构机穿越砂、砾石层换刀需要, 刀盘刀具采用固定刀具和带压换刀相结合的方式。刀盘正面、背面、边缘处焊接耐磨板。海瑞克盾构机2把周边刀具设有磨损检测装置, 另配1个耐磨条磨损探测; 自制盾构机配置10个磨损检测装置。施工中可根据刀具磨损监测系统数据做好刀具更换。

3. 材料设备保证措施

水泥、膨润土、水玻璃等主要材料等查验出厂合格证明文件, 材料进场需要送检的待检测合格后方可使用; 充分保证盾构机主要零部件、管片等质量和主要材料、应急物资供应; 备足盾构机易损易磨件; 多投入材料车辆、叉车等运输工具, 确保施工的连续性和提高突发事件的应急处理能力。

(二) 快速路大盾构推进对并行地铁隧道相互保护对策

1. 泥水压力设定

合理设定开挖面压力, 控制地层变形。泥浆压力与开挖面的水土压力、排出渣土量与开挖渣土量应保持平衡, 并应根据掘进状况进行调整和控制。

1) 大盾构并行段正常推进根据地面和地铁隧道沉降监测数据, 动态调整正面泥水压力, 及时调整泥水压力设定值, 每次调整幅度0.005MPa。根据试验段推进参数土压力系数设定为0.75, 切口水压值 $P=0.75 \sum \gamma_x \cdot H_x$, P 为切口水压值(kPa), γ_x 为各层土的容重(kN/m³), H_x 为各层土的厚度(算至隧道中心, 单位m)。

2) 并行段最大覆土埋深35.3m, 同时穿越⑫₁中砂、⑫₄圆砾层, 结合地层变化、隧道中心覆土深度和同步施工监测数据逐环优化调整施工参数。重点控制盾

构机上部泥水压力,波动值 $\leq 20\text{kPa}$ 。

2. 泥水质量和循环控制

根据工程地质条件,经试验确定泥浆参数,检测泥浆性能,并实施泥浆动态管理。

1) 泥水密度控制在 $1.15\sim 1.30\text{g/cm}^3$ 左右,同时黏度控制在 18s 以上(漏斗黏度)。全断面砂石地层泥水黏度控制在 20s 以上,含砂量 $1\%\sim 2\%$ 。每环同步注浆浆液须测试坍落度,按 $12\text{cm}\sim 16\text{cm}$ 控制,密度 $> 1800\text{kg/m}^3$ 。

2) 圆砾土流动性较差,推进过程中为防止带出的渣粒在管路内沉淀引起管路堵塞,除勤清洗储浆筒、注浆设备、管路等外,需充分利用盾构机本体干砂计量设备,准确计量排出泥浆中的干砂量;推进过程中为确保渣土正常循环,严格控制泥浆比重和流量,泥浆比重按 1.25s 左右控制,在砂砾层和盾构进洞时泥水添加堵漏材料。掘进流量、排泥流量、旁路流量分别控制在 $1300\text{m}^3/\text{h}$ 、 $1600\text{m}^3/\text{h}$ 和 $1400\text{m}^3/\text{h}$ 左右。

3. 盾构姿态控制

盾构需保持匀速推进,纠偏时控制单次纠偏量,逐环和小量纠偏,不急纠、不猛纠。推进速度不宜过快,否则易引起正面土体挤压过大,或后坐力过大。为减少对土体产生较大的扰动,按地层不同调整推进速度,砂层断面到环断面逐渐变为全砂层断面、全砂层断面、环中间为石层加砂层中推进速度分别控制在 $30\text{mm}/\text{min}$ 以下、 $20\text{mm}/\text{min}$ 以下、 $10\text{mm}/\text{min}$ 左右,同时结合盾构推力、刀盘扭矩变化情况,当出现异常时减慢盾构推进速度。

4. 同步注浆控制

1) 同步注浆材料采用填充性好、凝结时间少、收缩率小、止水性好、流动性好、离析少、可泵性好和不产生污染的单液浆。

2) 充分利用盾构本体同步注浆系统6个注浆点,对管片外围空隙同步压注浆液,确保盾尾间隙及时有效填充,防止地面塌陷。

3) 通过优化同步浆液的配合比,提高同步浆液的初凝时间,增加砂、石灰用量分别增强浆液抗剪性能和提高浆液抗剪强度,减小管片脱出盾尾后的上浮量。浆液主要材料 1m^3 按砂 1200kg 、水 $285\sim 300\text{L}$ 、石灰 100kg 、膨润土 30kg 、粉煤灰 300kg 和添加剂 3kg 配比。

4) 注浆压力和注浆量。注浆压力按以下公式进行设定:

$P=P_1+P_2+P_3$ (P 为注浆压力, P_1 为相应位置的切口水压力, P_2 为管阻取 2bar , P_3 为常数 15bar , $P_{\text{上}}=P+1\text{bar}$, $P_{\text{下}}=P-1\text{bar}$)。

视掘进情况调整压力参数,做到注浆压力和周围土压力维持平衡。注浆采用压力和注浆量“双控”。每次注浆完成后立即对注浆管路清理,以防管路堵塞而引起的压力异常。

为防止大隧道上浮,须对建筑空隙填充饱满,正常段实际注浆量控制在理论建筑空隙的 110% 和 130% 之间,超埋深砂砾层推进实际注浆量控制在理论建筑空隙的 120% 和 130% 之间。同步注浆量根据大隧道上浮情况、地

面沉降、地铁隧道变形情况进行动态修正。一般地层每环注浆量充填系数按 $1.30\sim 1.80$ 控制,富水地层可按 $1.50\sim 2.50$ 控制。

5) 盾构机共设有7个壳体注浆孔,特殊情况下盾构掘进时对每个注浆孔压注水灰比 $1:0.6$ 水泥浆和水玻璃,配比为 $20:1$,工作压力约为 0.3MPa 。根据地面和盾构轴线监测情况,调整注浆的部位和方量,增强土体对盾构机承载和对地面的保护。

5. 盾尾油脂压注

根据土层含水量大、渗透系数高、有承压水等实际情况,盾尾油脂压注应定期、定量、定位压注,正常段每环的压注量为 160kg ,在超深埋段增加盾尾油脂压注量,保持盾尾油脂压力一直高于外部压力。盾尾密封也尤为重要,当发现盾尾有漏水、漏泥、漏浆或漏砂时,应对该部位及时补压盾尾油脂。

6. 隧道轴线控制

从隧道测量的精度、管片选型、盾构姿态和切口水压等方面严格控制。监测隧道纵向变形,依据监测结果调整注浆部位及注浆量,做针对性的注浆,严控浆液的坍落度。

7. 进洞段浅覆土推进控制措施

1) 密切关注切口水压波动,人工调整施工参数,把切口水压波动值控制在 $\pm 0.005\text{MPa}$,保证正面稳定。

2) 推进速度加固区内控制在 $10\text{mm}/\text{min}$ 左右、加固区外控制在 $30\text{mm}/\text{min}$ 以下。

3) 进洞段覆土较浅或与地铁隧道距离较近处,为防止隧道上浮对地铁隧道产生较大影响,主要控制好以下几点:①高程按负偏差进行控制;②拧紧所有纵环向螺栓,盾构前八环增设剪力销和预埋钢板,在块与块、环与环之间使用钢板进行连接,提高隧道整体性;③及时安装“口”型件并浇筑两侧道路结构,增强隧道抗浮能力;④同步注浆在浆液中添加堵漏剂的同时,根据监测数据再加入水泥,水泥加入量按实际监测情况确定,以减小大隧道上浮量。

8. 二次注浆控制

1) 原则上快速路大盾构只采用同步注浆,但当地铁区间隧道出现变形报警时,对地铁隧道、大盾构隧道分别进行微扰动注浆、二次注浆。

2) 注浆加固材料采用水泥浆和水玻璃双液浆。初凝时间控制在 $30\text{s}\sim 60\text{s}$,体积收缩率小于 5% 。原材材料使用 $P.0.42.5$ 水泥和 $35^\circ\sim 42^\circ$ 水玻璃;加固土水泥掺量(重量比)为 $5\sim 7\%$,水灰比按 $0.5\sim 0.6$ 。加固注浆坚持“均匀、少量、多次、多点”的注浆原则。在对并行段隧道下卧土层加固时须兼顾隧道线形平顺,注浆受隧道沉降变形的限制,注浆频率、注浆位置、注浆单节高度、注浆量等参数需根据隧道监测数据动态调整。

9. 地铁区间隧道防沉降措施

1) 为提高大盾构穿越并行段后地铁隧道的二次注浆和应急处理能力,地铁隧道与快速路隧道并行段每块管片均增设2个注浆孔,必要时在隧道下半圆进行二次注浆。

2) 为提高管片间纵向与环向连接强度, 将连接螺栓机械性能等级由5.8级提高至6.8级。

3) 穿越并行段后沉降控制也是一项控制的重点, 也是容易忽视的一个方面。待盾构穿越后, 必须对快速路隧道结构继续进行跟踪监测, 直至快速路隧道及地表变形趋于稳定, 必要时在并行段隧道内进行壁后二次注浆。

10. 监测控制措施

11. 地铁区间隧道监测

大盾构推进处对应的地铁区间隧道向两侧各延伸50m范围采用自动化和人工复核相结合监测的方式。

12. 大盾构隧道监测

重点做好隧道自身沉降、水平收敛、竖向收敛和周边地表、建(构)筑物、管线沉降等监测。

盾构掘进过程中若出现参数异常突变、渣土改良效果变差、出土量异常和监测预警时, 应及时组织召开专家分析会, 并迅速采取有效措施进行处理。

13. 环境巡查措施

施工期间及工后稳定前, 重点对地面、建(构)筑物、外露管线、隧道有无缝隙、渗漏等情况进行巡视, 当发现裂缝、隆陷等异常情况时, 对异常部位加密布设临时监测点, 密切关注后续变形情况并跟踪监测。

四、监测情况

以大盾构北线推进至959环、南线推进至858环位置为例, 地铁隧道最大拱底沉降不超过7mm, 监测无异, 见下图4。



图4 江-星地铁隧道沉降监测表

地铁隧道经过热滑、跑图, 2020年11月12日监测数据显示, 道床沉降变化较小, 具体情况见下图5。

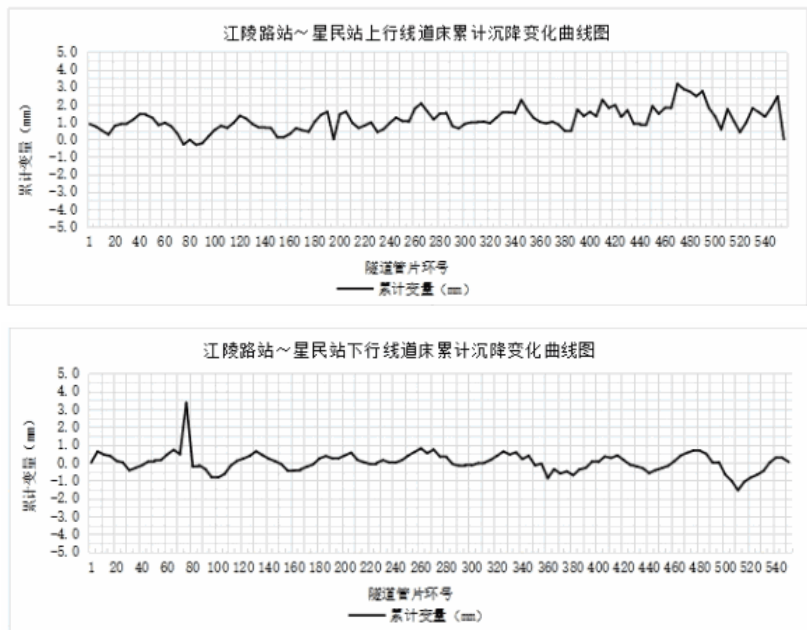


图5 江-星地铁隧道道床累计沉降变化曲线图

五、结论

综上所述, 由于在大盾构隧道施工前, 通过对施工环境作了进一步详细调查、摸排, 提前研判和研究制定了切实可行的风险管控措施。通过不同地层、不同环境、影响大小等, 从盾构机针对性设计、注浆材料、泥水质量、同步注浆、盾构推进速度、盾构姿态、监测控制等一系列措施, 加强“事前、事中、事后”控制。虽曾出现一些地表、管线沉降黄色预警和盾构机外周撕裂刀头、圆弧刮刀磨损严重等问题, 但经过应急注浆、带压更换刀具等措施, 地表、隧道结构未发生较大的沉降、位移、突变等情况。监测结果表明大盾构推进过程中对地铁隧道所采取的保护措施和控制对策可行、有效, 对地铁隧道影响较小, 大盾构顺利地通过了并行段施工并安全接收。

参考文献

[1] 夏能武, 朱灵胜. 盾构开挖对后方衬砌应变及受力扰动监测[J]. 上海建设科技, 2021(6): 35-38.
 [2] 任涛, 李桂荣, 张芳, 等. 临近既有地铁隧道大直径盾构施工及现场监测[J]. 浙江建筑, 2022, 39(05): 57-61.
 [3] 杨洋昶. 浅论交叉施工风险管控—以盾构穿越既有运营地铁为例[J]. 智能城市, 2021, 7(22): 100-101.
 [4] 娄秋林. 浅谈大口径钢顶管过江段施工控制要点[J]. 江西建材, 2016(18): 111-112.
 [5] 徐铭. 钱江隧道东线出洞关键施工技术[J]. 中华建设, 2012(07): 294-295.
 作者简介: 姚海生, 1976年, 男, 汉, 甘肃秦安, 本科, 工程师, 从事工程管理研究。