

富水地层下叠落盾构隧道施工关键技术及其管理研究

孙 坚, 黄 胜, 刘 琦

(南京市轨道交通建设工程质量安全监督站, 江苏 南京 210000)

摘 要: 针对叠落盾构隧道在始发接收及掘进过程中, 面临结构承载要求高、地层扰动控制难、易发生突水涌水等质量安全难题, 以南京地铁6号线岗子村站及相邻叠落区间为背景, 为有效控制施工风险、保障工程安全和工期要求, 采用叠式始发接收复合支撑体系、端头及叠线段土体注浆加固、移动同步支撑台车等多重技术与管理措施。结果表明: 后浇始发接收中板最大变形控制在5 mm以内, 地表最大沉降为19.1 mm, 周边建筑物及既有4号线隧道变形均控制在限值范围内, 较传统工艺缩短工期20%。通过采用复合支撑体系与同步支撑台车等技术措施, 并严格落实相应的施工与监督管理要点, 可有效控制叠式始发接收与掘进施工过程中的质量安全风险。

关键词: 轨道交通; 长距离叠落盾构隧道; 叠式始发接收; 同步支撑台车; 质量安全监管

中图分类号: U455.43; U455.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)04-0162-08

Key Technologies and Supervision Management of Stacked Shield Tunnel Construction in Water-rich Strata

SUN Jian, HUANG Sheng, LIU Qi

(Nanjing Urban Rail Transit Construction Project Quality and Safety Supervision Station, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: Taking the Gangzicun Station and its adjacent stacked section of Nanjing Metro Line 6 as the engineering background, which is located in water-rich strata, featuring a long stacked section and long-distance parallel alignment with an existing operational line, key technologies and supervision management of stacked shield tunnel construction were proposed and evaluated. During the initiation, reception, and excavation of the stacked shield tunnel, the project faces quality and safety challenges including high structural bearing requirements, difficult ground disturbance control, and high risk of water inrush. To effectively control construction risks and ensure engineering safety and schedule requirements, multiple technical and management measures were adopted, including the stacked initiation-reception support system, grouting reinforcement for tunnel ends and stacked sections, and mobile synchronous support trolleys. The engineering implementation results show that the maximum deformation of the post-cast initiation-reception middle slab was controlled within 5 mm, the maximum ground surface settlement was 19.1 mm, and the deformations of surrounding buildings and the existing Metro Line 4 tunnel were all kept within allowable limits, with the construction period shortened by 20% compared with traditional methods. The research indicates that by adopting technical measures such as the composite support system and synchronous support trolley, and strictly implementing corresponding construction and supervision key points, the quality and safety risks during stacked initiation, reception, and excavation can be effectively controlled.

Keywords: rail transit; long-distance stacked shield tunnel; stacked initiation and reception; synchronous support trolley; quality and safety supervision

在土地资源日益紧张的城市核心区,随着地铁既有线路的增多,换乘车站的建设因受先建既有车站的影响,往往面临着地上和地下建设空间被严重压缩、对运营车站区间保护难度大等问题,为解决难题,全国各地采用上下重叠的盾构隧道(简称“叠落隧道”)越来越常见,此法可有效减少后建换乘车站及相邻区间占用的平面空间,但同时也带来了前所未有的工程风险和技术挑战。

近年来国内多个城市已有采用叠落隧道的地铁工程实例,针对叠落隧道施工技术,国内外学者也已开展了大量研究,并总结了一批成功经验。Hage Chehade 等^[1]、Fang 等^[2]通过数值模拟发现,竖直并列隧道的沉降大于水平并列,且先施工上部隧道会导致更大沉降与弯矩。Boon 等^[3]基于吉隆坡 KVM-RT 叠落隧道采用“先上后下”非常规施工工序,实测得出沉降幅度是常规顺序(先下后上)的 5 倍以上。Mojtahedi 等^[4]模拟了非同步开挖叠落隧道,指出当隧道埋深与间距减小至 2 倍洞径以下时,最大地表沉降增大。Soomro^[5]研究了叠落盾构隧道在砂土中侧穿筏桩基础对基础的影响。Maung 等^[6]研究了软土地层叠落隧道对既有隧道和桩基的近接效应。Liu 等^[7]、Zhang 等^[8]依托北京地铁叠落隧道研究了层间土体注浆+内钢支撑组合加固形式可有效减少对下方既有隧道变形影响。魏纲等^[9]、李振东等^[10]结合数值分析与现场实测,研究了重叠隧道施工造成的地层变形影响规律。马金骥^[11]、刘海智^[12]探究了施工步序、夹层土注浆、台车支护三种针对叠落盾构施工变形控制的优化方式,得出“先下后上”优于“先上后下”。王文正等^[13]、李兆平等^[14]、杨志文等^[15]依托北京地铁,研究了叠落盾构隧道端头加固、夹层土注浆和下层隧道临时型钢支撑加固措施的可行性。李其宾等^[16]、吴成睿等^[17]对郑州地铁叠线盾构接收钢支撑托架、洞门加固等施工技术进行了研究。朱禹等^[18]、韩琳亮等^[19]分析了叠线盾构隧道对既有运营隧道的影响。阳林等^[20]分析了叠落隧道采用地表注浆和下行隧道设置门式钢架支撑的方式控制既有建筑物变形。总体而言,目前国内外叠落盾构隧道研究结论基本一致,国外更加偏向于对变形规律的理论计算和试验研究,国内则在工程案例与施工经验方面更为丰富。

以上研究多为对隧道掘进过程的力学与变形影响分析,且叠线段距离较短,对于叠式盾构始发接收、长距离叠落隧道同时掘进的施工工艺在实际工程中的应用研究还很少,对叠落隧道施工过程中的

质量安全管控要点研究也较少。岗子村站及相邻区间具有叠线段距离更长、钢套筒接收荷载更大、与既有运营隧道长距离并行、上下行线同时掘进、车站兼具叠式始发和叠式接收等多重特殊工况,在国内地铁工程中相当罕见。岗子村站是南京首个既叠式始发又叠式接收的地铁车站,其相邻岗花区间为目前国内最长叠线区间,具有重叠段长(最长 1 260 m)、间距小(最小 2 m)、地质条件复杂(中风化闪长岩、富含水)及周边环境敏感等特点,且叠线段长距离平行穿越既有 4 号线隧道(并行段约 1 360 m),是典型的极高风险工程。本文以此工程为案例,系统梳理并总结了叠落隧道的始发接收掘进过程涉及的井口支撑体系、同步支撑台车、注浆加固、施工过程控制等关键技术和质量安全管控要点。

1 工程概况与重难点分析

1.1 工程概况

岗子村站为地下三层明挖车站,是新建 6 号线与既有 4 号线的换乘站。岗子村站相邻两侧区间概况如表 1 所示。富岗区间从岗子村站叠式始发至富贵山站平行接收,重叠段长度 122 m;岗花区间从花园路站平行始发至岗子村站叠式接收,重叠段长度达 1 260 m,且叠线段与既有 4 号线岗蒋区间并行,与 4 号线隧道平面净距约 6.8 m,位于既有 4 号线隧道斜下方,如图 1 所示。区间地处上软下硬富水地层,主要穿越全风化、强风化和中风化闪长岩,岩层起伏变化大,强度平均为 53 MPa,最高达 145 MPa。地下水主要有孔隙潜水和基岩裂隙水,富水性及透水性呈不均匀性、各向异性,潜水与基岩裂隙水含水层之间水力联系密切。潜水埋深为地面下 0.5~3.2 m,基岩裂隙水位埋深为 1.7~4.7 m,水位较高,尤其基岩裂隙水具承压性,强风化岩层开挖后裂隙增大增多,透水性增强,极易发生突水涌水情况,故即使区间穿越岩层强度较高,车站围护结构还是采用了隔水安全性较高的地连墙,盾构接收采用了全钢套筒密闭接收。

表 1 区间线路概况表

区间名称		区间长度/m	叠线段上下间距/m	叠线段长度/m	最小半径/m	最大坡度/%
富~岗区间	上行线	1855.921	2.0~3.5	122	350	27.48
	下行线	1685.855			350	26.00
岗~花区间	上行线	2206.46	2.1~6.0	1260	400	21.00
	下行线	2247.527			400	28.00

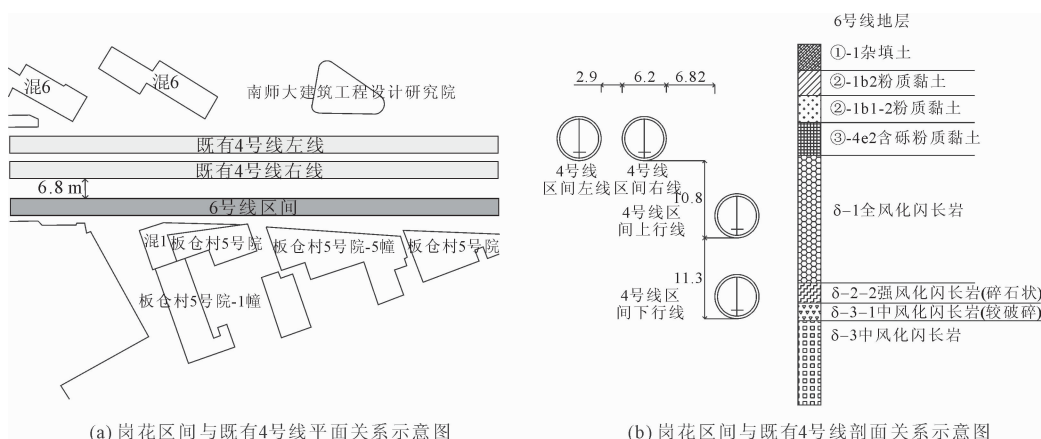


图 1 岗花区间与既有 4 号线位置关系示意图

1.2 工程重难点

(1) 结构受力复杂: 始发接收井中板需承受高达 403 t (始发) 至 730 t (接收) 的盾构设备荷载, 且受力点集中。井口后浇中板在结构强度达到设计要求, 同时板下盘扣支架不拆除的条件下仍然无法达到承载要求, 存在结构变形失稳风险。

(2) 围岩强度高工期要求紧: 因施工受限车站主体施工进度严重滞后, 区间穿越地层强度高, 盾构掘进速度慢, 开仓换刀频繁, 叠落隧道始发接收掘进工艺要求复杂, 造成该工点工期进度成为影响全线通车的关键节点。

(3) 叠落段扰动控制难: 长距离小间距叠落隧道施工, 后建(上行)隧道掘进的扰动加上盾构设备的荷载极易导致先建(下行)隧道管片产生开裂、错台与不均匀沉降, 因工期紧、叠线段距离长, 现场采用上下同步掘进的方案, 下行隧道成型时间较短即承受上行隧道荷载扰动, 变形风险更高。

(4) 地质与周边环境复杂: 区间穿越富水地层, 掘进突水涌水风险高; 区间紧邻既有 4 号线隧道, 并行约 1 360 m, 且穿越老旧小区, 周边建筑物密集多为砖混结构, 对地层变形与结构沉降控制要求更高。

针对以上工程重难点, 南京林业大学杨平等^[21-22]、赵修杰等^[23]、陈佳等^[24]、朱俊等^[25]通过数值模拟和现场实测等手段全面分析了叠落隧道始发掘进过程的地表变形规律、上行线掘进对下行线的变形影响规律以及叠线掘进对临近既有运营线的变形影响规律等。通过研究得出本工程采用“先下后上”步序、袖阀管注浆始发端头加固、后浇中板+盘扣架+钢管柱支撑体系、台车支撑配合夹层土体注浆加固等方式, 可有效控制下行线和既有 4 号线隧道变形在限值范围内。

2 叠落盾构隧道施工关键技术

2.1 叠式盾构始发与接收关键技术

为解决叠落隧道上行线始发接收时井口中板的巨大集中荷载问题, 本项目创新性地采用了“钢管柱支撑体系”与“满堂盘扣架支撑体系”独立设置、协同工作的复合支撑方案。

(1) 钢管柱支撑体系: 作为上行线盾构机及钢套筒设备的直接承重体系。采用 8 根钢支撑作为上行线盾构始发接收平台的竖向支撑构件, 支撑底部设置于底板混凝土基础梁上, 另在始发反力架斜撑下方设置 4 根钢支撑。下线隧道完成始发接收后先施工井口中板, 将中板作为上线始发接收平台, 在支撑节点处增设纵横梁, 如图 2 所示。该体系将盾构设备重力通过中板梁传递至钢支撑再至底板, 有效避免了中板局部集中受力。

钢管柱支撑体系受力分析:

始发时中板最大上部荷载为盾构机+始发托架重量约 403 t, 接收时中板最大上部荷载为钢套筒+装满土重量约 730 t。接收时中板上部荷载更重为 7 300 kN, 中板自重为 440 kN。单根钢支撑抗压强度设计值 215 N/mm^2 , 外径 609 mm, 壁厚 16 mm, 安全系数取 1.2, 轴压稳定系数 $\varphi = 0.915$ 。单根钢支撑强度验算 $N/A = 38.9 \text{ N/mm}^2 < 215 \text{ N/mm}^2$, 稳定性验算 $N/(\varphi A) = 42.5 \text{ N/mm}^2 < 215 \text{ N/mm}^2$ 。

经验算, 设置 8 根钢管柱可满足承载受力要求。虽钢管柱的承载能力富余量较大, 但为减小中板梁的弯矩受力, 设置 8 根钢管柱从梁板配筋面积和现场布置施工等方面考虑较为合理。始发、接收中板及中板纵横梁的结构配筋使用 PKPM SATWE2025R1.0 版软件建模, 通过验算弯矩、剪力、挠

度、裂缝等满足承载受力要求,中板配筋如图 3 所示。

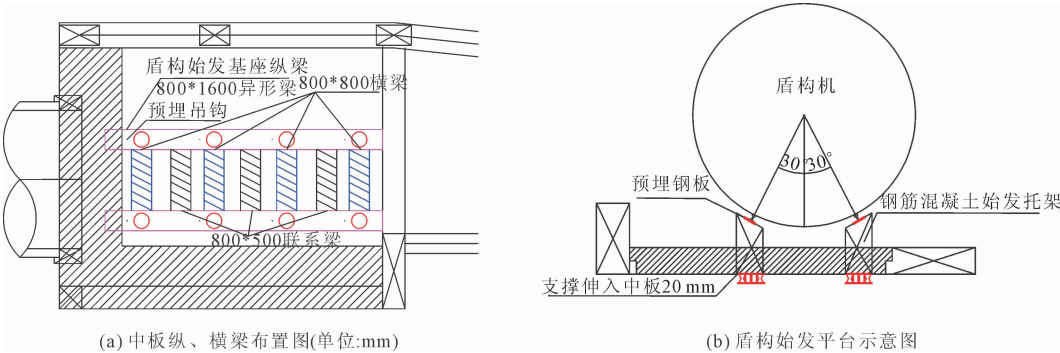


图 2 井口后浇中板(始发接收平台)示意图

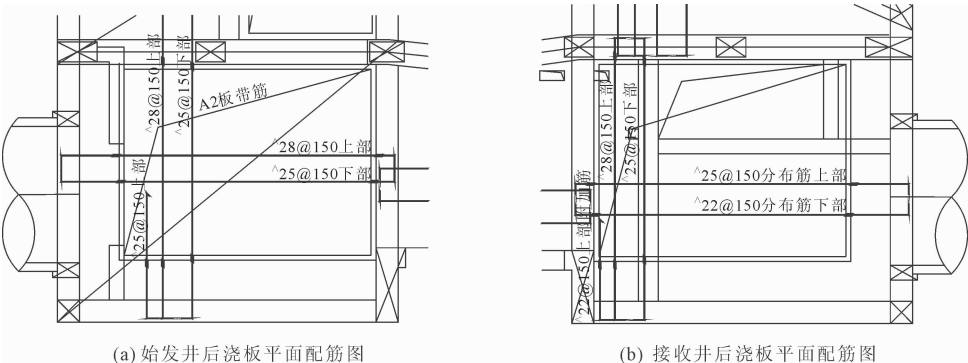


图 3 井口后浇中板配筋图

(2) 盘扣架支撑体系:作为后浇中板的模板支撑体系,后浇中板设计厚度 800 mm,始发采用门式支架以便电瓶车通行,接收采用满堂支架。相较于传统钢管柱托架体系采用型钢剪刀撑相互连接的方式,

采用盘扣式支架施工效率更高,不影响电瓶车出入,且支架可兼做钢支撑安装拆除的作业平台使用,如图 4 所示。

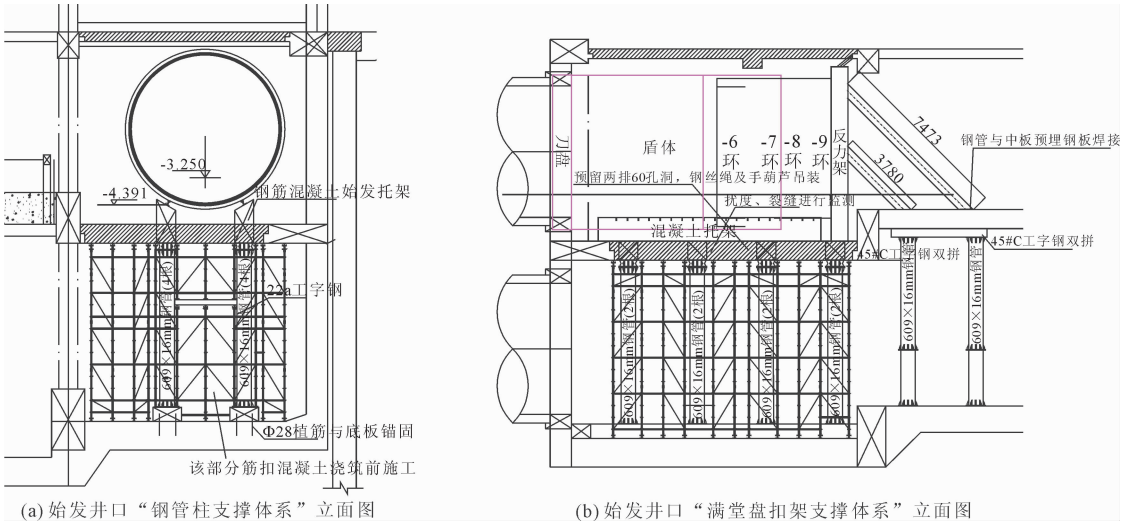


图 4 始发井口后浇板支撑体系立面图

(3) 叠线盾构端头加固:岗子村站始发端采用袖阀管注浆加固,接收端采用 800 厚素混凝土地连

墙+压密注浆(如图 5),加固体尺寸为 12.2 m(隧道拱腰外 3 m)×10.0 m×29.0 m(下行线隧道拱底

以下 3 m)(长×宽×深)。相较于传统三轴水泥土搅拌桩、冻结加固等,采用袖阀管注浆和压密注浆加固对周边环境影响更小。

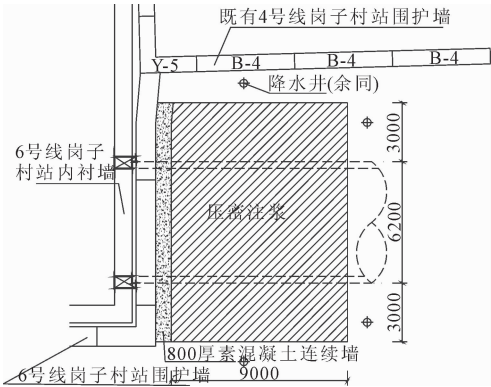


图 5 岗子村站接收端头加固平面图

(4) 监控量测:通过在支撑体系和中板的角部与中部布置监测点,对中板挠度、裂缝及支撑结构沉降进行实时监测。挠度控制在 $L/400$ 内,沉降控制在 +25 mm 内,监测数据是判断结构安全、指导支撑拆除的关键依据。

2.2 叠落盾构隧道同步掘进关键技术

为减小上行线掘进对下行线成型隧道的扰动影响,同时保证下行线隧道支撑台车移动时上行线盾构掘进效率,本工程研发应用了盾构长距离叠落隧道支撑台车上下行线同步施工工法。

(1) 移动支撑台车工作原理:支撑台车安装于下行线隧道内,总长 30 m(4 节),通过液压举升油缸使顶部丝杆紧顶管片(如图 6),形成刚性支撑体系,将上行线盾构机的主机重量及掘进动荷载传递

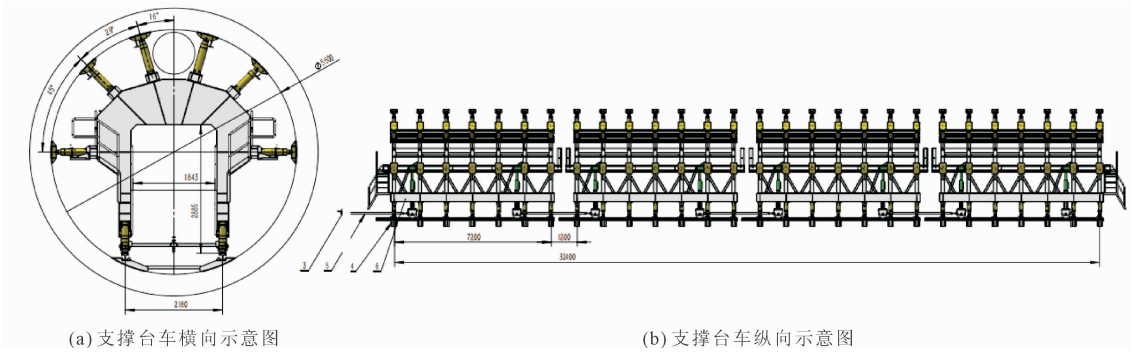


图 6 移动式同步支撑台车

至下行线隧道整体结构,避免下行线隧道顶部集中受力。台车行走原理为:上线盾体长 10 m,始终保持上方盾体处在台车支撑范围内。当上线盾构掘进刀盘快超出台车前端时暂停推进,下线采用快收快撑的方式移动台车至台车尾部接近上线盾尾位置。台车移动时先将前两节卸载用电瓶车拖运至目标位置重新加载,再将后两节卸载拖运至与前车连接后重新加载,全部加载完成后,再继续推进上线盾构,以此工序循环施工。

利用远程调控系统对液压支撑系统进行精准调控。管片差异沉降控制在 $0.04\% L_s$ (L_s 为监测点间距) 内,管片净空收敛控制在 $0.2\% D$ (D 为开挖直径) 内。

(2) 叠线段注浆加固技术:为控制对既有 4 号线隧道的扰动影响,对上行线与既有线之间土体进行地面预注浆加固。为确保下行线成型隧道结构的安全,重叠段管片增设注浆孔(16 孔/环),对重叠段下线隧道上半部范围和上线隧道全断面进行二次注浆,如图 7 所示。上方隧道盾构通过重叠段前,对下方隧道重叠段及其前后 20 环范围内再次进行壁后注浆。

(3) 台车智能监测调控:每节支撑台车分别在 4 个丝杆上安装应变计,实时采集轴力与变形数据,并

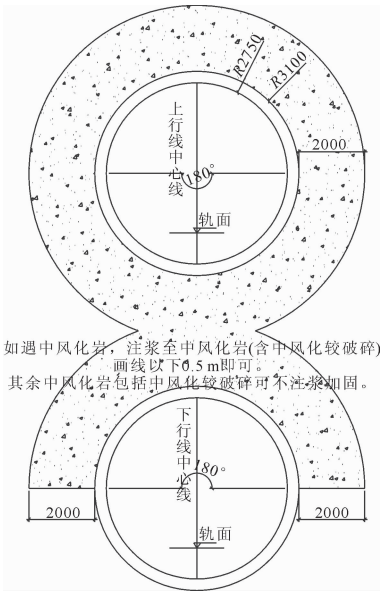


图 7 叠线段二次注浆加固示意图

3 叠落盾构隧道施工监督管理要点

3.1 质量监督管理要点

(1)钢支撑基础施工质量:钢支撑基础梁的设置可避免底板局部集中受力,基础梁采取植筋后锚固方式与底板连接。植筋深度应不小于 $15d$ (钢筋直径),并按照JGJ 145—2013附录C.2.3中重要构件按3%不少于5根对植筋拉拔力进行检测。基础梁底部在钢支撑位置安装预埋钢板,严格控制安装位置和平整度,并与基础梁钢筋焊接牢固。基础梁混凝土强度达到设计强度后方可进行钢支撑安装。

(2)钢支撑安装质量:钢支撑关系到整个支撑体系的安全稳定。钢支撑安装垂直度偏差应 $\leq 1\%$,钢支撑与预埋钢板应满焊。因不同于传统托架采用型钢主楞,而采用直接由中板纵梁传递荷载的方式,钢支撑安装高度按照高于后浇中板底面2 cm控制,保证支撑与中板梁有效连接。如图8所示。始发反力架斜撑因设置在车站主体已完成中板上,故斜撑下方钢支撑上部采用工字钢+预加应力方式保证和中板密贴。



图8 钢管柱顶面高出中板模板

(3)后浇中板及始发导台施工质量:后浇中板内增设2条纵梁、4条横梁以有效传递荷载,纵梁上斜面角度为 30° 以兼作为盾构始发导台使用,纵梁顶部焊接预埋钢板,以便安装钢轨,纵梁间设置3条联系梁以加强水平受力(如图9)。纵横梁及联系梁的配筋须经过专门设计,质量管控重点在于钢筋和预埋钢板的安装,主筋、箍筋的规格数量、间距、锚固长度、导台坡度应符合设计要求。

(4)土体加固质量:应在盾构施工前完成对车站始发接收端头、新建隧道与既有4号线隧道之间的土体加固工作,通过钻芯法对加固体质量进行检

测,确保加固体强度满足设计要求后方可进行始发接收和掘进作业。本工程在接收端头地连墙外侧加设了一道素地连墙作为止水隔幕,还应按设计要求对素墙进行完整性检测。



图9 中板始发导台纵梁及联系梁施工

(5)掘进过程质量控制:以平均3~4环/天的速度缓慢匀速掘进,且上下行线保持不少于80 m距离,确保下行线隧道成型和注浆加固效果达到稳定。同步注浆压力在2.0~3.5 bar,注浆量在理论注浆量的150%~200%,二次注浆压力在3.0~5.0 bar,掘进过程通过采用浆液消耗量与注浆压力曲线双控法,以注浆量是否达标及压力曲线是否平缓为判定依据,并逐环形成记录。注浆完成后通过雷达扫描方式对壁后注浆密实度进行检测。

3.2 安全监督管理要点

(1)因盾构叠式始发掘进接收的特殊性,除了常规的需要专家论证的方案外,始发接收后浇中板模板支撑体系、同步支撑台车、土体加固等重要的专项施工方案均应经过专家论证,并应附有相应的计算书。叠式始发、接收、穿越既有线路等均应按照一类关键节点要求进行条件核查工作。

(2)钢支撑及盘扣架支撑体系的安装、拆除作业应严格按照方案要求。当后浇中板混凝土强度达到60%设计要求时方能拆除门洞位置盘扣支架供电瓶车通行,盾构机及后配套、钢套筒在后浇中板混凝土强度满足设计要求后方可进行吊装。待盾构机始发接收完成后,先拆除盘扣脚手架,后拆除钢管柱支撑体系。始发反力架下钢支撑拆除前应先卸载预应力。

(3)除盾构掘进常规监测项目外,须加强对后浇中板变形、支撑台车应力的实时监测和观察巡视,根据监测及巡视情况实时评估后浇中板和下行线隧道结构的安全状态。严格控制盾构掘进参数和实际出土量,以维持一定土压力。要严格控制好下线支

撑台车同步跟进的施工节奏,始终保持上行线盾体处在台车支撑范围内。当监测数据、出土量超出预警值时立即停止施工,并由建设单位牵头研究处置方案,必要时采取加固措施。

(4)对整个盾构区间施工过程各参建主体应按照国家重大风险等级实施风险管控和隐患排查治理,编制富水地层隧道涌水涌砂专项事故应急预案,建立应急响应机制。在始发前确保现场配备好聚氨酯、注浆机、水泥水玻璃、应急电源等应急抢险物资设备,成立应急抢险队并提前组织实操应急演练。

3.3 工程应用效果

目前岗子村站两侧叠落盾构隧道已顺利完成始发、掘进、接收工作,施工全过程监测数据稳定,未出现异常情况。经现场实测,叠式始发接收过程中,井口后浇中板最大变形小于 5 mm,盾构掘进过程中,叠线段隧道周边地表最大沉降 19.1 mm,下行线拱顶最大沉降 7.7 mm,周边建筑物最大沉降 18.2 mm,既有 4 号线拱顶最大沉降 2.6 mm。

4 结 论

(1)“钢管柱+盘扣架”复合支撑体系能够有效解决叠式始发接收井口部承受巨大荷载的难题。该体系设计安全可靠,在保障上行线盾构始发安全的同时,显著缩短了对下行线盾构掘进施工的干扰时间。相比传统型钢支架工艺,综合施工进度提升 20%。

(2)同步支撑台车工艺结合土体注浆加固等措施,可有效控制叠落隧道及邻近既有线路的变形影响。相较于传统型钢支架,机械化程度更高、安全风险小,尤其适用于长距离叠落隧道施工。

(3)结合前期研究成果与本工程实践经验,针对类似工况的施工与监管,总结出以下建议:

① 优选施工工序与结构形式:上下垂直叠落式盾构隧道应优先采用“先下后上”工序。工期紧迫需上下同时掘进时,上下盾构推进间距不小于 80 m,可将中板作为始发接收平台,采用门式中板支撑架和长度 30~40 m 的门式移动支撑台车,既可保障上方盾构掘进距离需求,又不影响下方土斗电瓶车运输渣土。中板若兼作始发接收平台,须经专项设计并适当增加富余量,确保承受巨大荷载时不影响结构安全。

② 推行高标准化、智能化工艺装备:优先选用盘扣式支架、钢支撑、支撑台车等定型化、标准化工艺,安拆便捷,减少人工焊接与现场加工,有利于质

量控制。优先选用智能化监控设备,对支撑应力、隧道变形、注浆压力等实时监测控制。

③ 强化关键部位质量控制与安全管理:除应做好常规盾构施工的质量安全风险管控措施外,质量管控重点还应包括:钢支撑及基础的施工安装、后浇中板及纵横梁的钢筋安装、端头加固及地面预注浆加固质量、叠线段二次注浆加固质量、地表变形和注浆参数的控制等,安全管控重点还应包括特殊工法的专项设计计算与方案论证、支撑体系及后浇中板的实时监测、支撑台车的移动与实时监控、掘进的参数与速率控制等。必须严格按照设计和方案要求施工,严禁在未采取加固措施的情况下盲目掘进。

参考文献:

- [1] Hage Chehade F, Shahrour I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(02): 210-214.
- [2] Fang Qian, Tai Qimin, Zhang Dingli, et al. Ground surface settlements due to construction of loosely-spaced twin tunnels with different geometric arrangements[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 144-151.
- [3] Boon C W, Ooi L H. Longitudinal and transverse interactions between stacked parallel tunnels constructed using shield tunnelling in residual soil[J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 2018, 49(02): 57-71.
- [4] Mojtahedi A S, Nabizadeh. A numerical approach to evaluating the asymmetric ground settlement response to twin-tunnel asynchronous excavation [J]. Soil and Rocks, 2022, 45(02): 1-10.
- [5] Soomro M A, Darban S A, Soomro R A, et al. Influence of sequential twin stacked tunnelling on deformation and load-transfer mechanisms of battered piled rafts under lateral and combined loading[J]. Transportation Geotechnics, 2026, 57: 101852.
- [6] Maung H L, Chao K C, Duangsano O, et al. Close proximity tunnelling and measures adopted in MRTA Orange Line-East project[C]//Duc Long P, Dung NT. Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. Hanoi, Vietnam: November 28-29, 2019. Singapore: Springer Singapore, 2020, 62: 361-368.
- [7] Liu Fei, Sun Leyuan. Research on the optimization of reinforcement measures and the deformation mechanism of the lower tunnel in the construction of the overlapping tunnels[J]. Applied Sciences, 2025, 15(20): 11016.

[8] Zhang Xu, Luo Bin, Xu Youjun, et al. Case study of performance assessment of overlapping shield tunnels with a small curve radius[J]. Deep Underground Science and Engineering, 2024,3(04):481-496.

[9] 魏 纲,朱德涵,王 哲,等. 复合地层重叠盾构隧道施工土体变形理论研究[J]. 地下空间与工程学报, 2026,22(01):38-46.

[10] 李振东. 上下重叠隧道盾构法施工引起的地面沉降分析[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(07):97-102.

[11] 马金骥. 邻江富水砂层叠落区间泥水盾构隧道变形特征与控制方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2023:77-78.

[12] 刘海智. 小净距叠线盾构隧道修建关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2019:95-97.

[13] 王文正,林雪冰,郭 飞,等. 小转弯半径叠落盾构隧道施工相互影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024,55(10):109-123.

[14] 李兆平,王 凯,姜厚停,等. 长距离叠落盾构隧道施工对已成型隧道影响及控制措施研究[J]. 土木工程学报,2020,53(S1):174-179.

[15] 杨志文,李文博,张 旭,等. 重叠盾构隧道施工扰动下型钢支撑加固效果及适用性研究[J]. 内蒙古科技大学学报,2025,44(03):267-275.

[16] 李其宾,沈 俊,肖 超,等. 叠线盾构隧道托架接收施工技术及稳定性分析[J]. 建筑机械化,2019,40(07):40-42.

[17] 吴成睿. 复杂环境下地铁叠线隧道盾构接收施工技术[J]. 安徽建筑,2025,32(09):41-43.

[18] 朱 禹,龚怀世,罗业华,等. 盾构隧道超小净距叠线地段支撑台车加固效果[J]. 岩土工程技术,2025,39(01):113-121.

[19] 韩琳亮,杨晓勇,申晓明,等. 软土地区小净距重叠隧道并行既有有线接收技术与实测分析[J]. 土木工程与绿色建筑,2026(01):43-46.

[20] 阳 林,龚 江,辛志勇,等. 盾构施工参数对叠落隧道侧穿建筑物的影响研究[J]. 城市轨道交通研究, 2026,29(02):63-70.

[21] 杨 平,于 游,朱 俊,等. 上软下硬富水地层临近既有有线叠线隧道盾构始发变形数值模拟研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2025,47(04):53-63.

[22] 杨 平,霍 畅,朱 俊,等. 叠线隧道盾构掘进对邻近并行既有营运线变形影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2025,41(03):356-366.

[23] 赵修杰,朱 俊,杨 平,等. 复合地层上下叠交隧道盾构始发技术与实测[J]. 林业工程学报,2025,10(06):134-141.

[24] 陈 佳,朱 俊,何 云,等. 长距离小净距叠落隧道组合支撑体系应用研究[J]. 建筑机械化,2025,46(01):95-99.

[25] 朱 俊,霍 畅,薛明胜,等. 邻近既有营运线叠线隧道盾构施工变形实测分析[J]. 岩土工程技术,2026,40(01):91-100.



(上接第 128 页)

[16] Liu Wei, Liang Jiabin, Xu Tao. Tunnelling-induced ground deformation subjected to the behavior of tail grouting materials[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research,2023,140.

[17] 穆 锐,刘元雪,刘晓英,等. 不同约束作用下红黏土抗剪强度特性试验研究[J]. 力学与实践,2025,47(03):566-574.

[18] 谢乐妃. 土的直接剪切试验与影响因素分析[J]. 江西建材,2023(05):118-119,122.

[19] 阿社夫. 双轴压缩下含孔洞节理岩体试验与数值模拟分析[D]. 长沙:中南大学,2022.

[20] 杜文睿. 砂卵石地层盾构刀具破岩机理及磨损预测研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2024.

[21] Graf E D. Compaction grouting technique[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1969,95(05):1151-1158.

[22] Brown D R, Warner J. Compaction grouting[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973,99(08):589-601.

[23] Warner J, Brown D R. Planning and performing compaction grouting[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1974,100(06):653-666.

[24] Brown D R, Warner J. Compaction grouting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1974,11(03):69.

[25] El-Kelesh A M, Mossaad M E, Basha I M. Model of compaction grouting[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001,127(11):955-964.