

地铁区间隧道近距离下穿直径3.8米PCCP输水管线施工技术研究

宋芊

中铁上海工程局集团有限公司

摘要：地铁区间隧道近距离下穿直径3.8米PCCP大伙房输水管线，通过技术论证，确定采取钻孔灌注桩+连续梁+管棚支托体系将管线与区间隧道隔离，然后采取盾构法施工。支托体系施工过程中通过优化管棚顶进施工、出土方式调整、钢管两端增加支撑、连续梁及时跟进作业及注浆加固等减小对输水管线的变形影响；盾构施工过程中通过掌子面土压力控制、推进参数控制、克泥效工艺、同步注浆调整、二次注浆跟进等抑制输水管线变形。通过技术管控、管理措施，安全顺利地完成任务。

关键词：支托体系；管棚施工；盾构；克泥效

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2021.23.047

引言

盾构法作为地铁隧道施工的常用工法，其机械化、自动化程度较高，施工技术的应用也比较成熟，在面对地下电缆、自来水管、燃气管、地下污水管方面较暗挖法能够较大程度的保障人员安全，降低损失。由于盾构施工特点，不可避免的造成地层变形（沉降或隆起），主要有盾构到达前的地层变形、盾构到达时开挖面地层变形、盾构主机通过时的地层变形、盾构通过后管片脱离盾尾空隙沉降以及地层后期固结变形。

对于隧道近距离下穿大直径管线的保护措施根据地质条件、管线运行状态、管线材质及接口形式、盾构与管线的相对位移关系等情况也不尽相同，通常采用拆改和迁移、地面深层注浆加固、管底注浆隔离、管道悬吊保护等技术。

随着穿越工程的增多及穿越间距的缩短，要求施工时必须采取措施控制、减弱施工对既有建构筑物的不利影响，保护既有建构筑物的正常使用和安全，新建隧道穿越既有建构筑物的施工措施已成为新一轮城市轨道交通建设必须深入研究的关键问题^[1]。

一、工程概况

沈阳地铁十号线桑林子车辆段出入线地下段初始设

计为矿山法暗挖施工，经现场调查发现区间隧道下穿两根直径3.8米PCCP大伙房输水管线，施工风险极大。通过研讨，将矿山法暗挖段变更为盾构法施工。

（一）盾构段设计概况

1#盾构井始发、2#盾构井接收，左线长282.26米，右线长294.16米，覆土厚度5.3~10.5米。平面曲线半径：左线450m、右线350m，纵坡：全程下坡、29%转7%。下穿输水管线段平面处于圆曲线段、纵坡为7%下坡。

区间隧道与输水管线平面投影斜交，左线与管线呈53°交角，下穿管线斜长23.7米，右线与管线呈57°交角，下穿管线斜长22.8米；隧道左线与输水管线A、B交点处竖向净距2.93m、3.06m，盾构隧道右线与输水管线A、B交点处竖向净距2.99m、3.11m。

（二）输水管线介绍

大伙房水库输水（二期）工程是将大伙房水库水源东水西调纵跨辽宁中南部经235公里的输水管线，送至抚顺、沈阳、辽阳、鞍山、营口、盘锦、大连等7城市，是目前辽宁建成的规模最大、覆盖面最广的水利工程，也是目前东北地区建成的最大的水资源配置工程，涉水人口上千万，被称之为辽宁省人民的生命线。该管线输水规模为327万t/d，输水水量约为7座城市总用水量的50%，于2010年11月17日正式通水运行，输水管线停止运营将会直接影响下游用水工业园生产和居民生活用水，将会造成数亿元的经济损失。风险等级为一级。

下穿段管道铺设方式为双管分槽埋设，管道底部垫层为150mm砂垫层，双管水平中心间距为15m，设计覆土厚度为1.6m，管道分节长度为5m，内径为3.2m，外径3.8m，设计供水压力为0.6MPa，管道接口为承插式双凹槽、双胶圈密封标准接口，保护外露的承插口钢构件不受腐蚀，管道外侧接头进行灌浆保护，水灰比为0.65的1：2水泥砂浆。

（三）水文地质

区间隧道下穿输水管线段地质由上而下依次为：杂

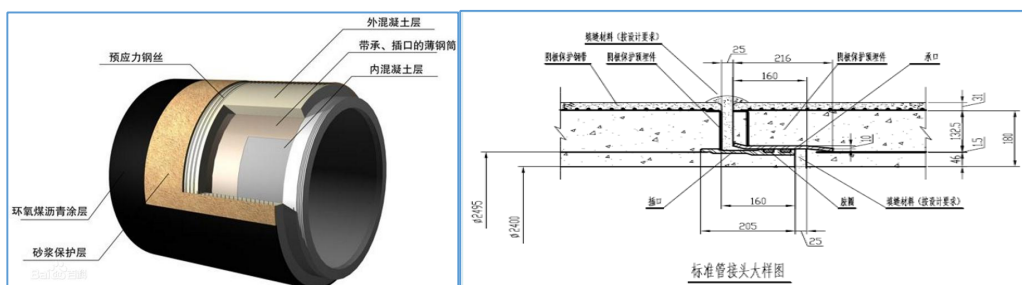


图1-1 输水管线管节连接方式

填土①（耕土①1）、粉质黏土③1、中粗砂③3。输水管线埋置于粉质黏土③1中；隧道范围基本为上部50%粉质黏土③1和下部50%中粗砂③3。

地下水赋存于圆砾、砂砾土层中，区间隧道范围内不含地下水。

二、关键施工技术

（一）设计方案

经过多次技术研讨、论证，首先从施工风险方面着手，将区间隧道由矿山法暗挖施工变更为盾构法施工，在盾构施工前对输水管线进行加固（钻孔灌注桩+连续梁+管棚支托体系），盾构施工增加克泥效工艺及深孔注浆措施。

1. 支托体系

采用钻孔桩+连续梁+管棚方式对管线底部进行支托保护，在管线A、B两侧分别设置1、2、3#工作坑，工作坑和管棚施工范围地层为粉质黏土，1、2#工作坑与管线水平净距为3.8m，3#工作坑与管线水平净距4.2m，工作坑采用倒挂井壁法施工。经现场挖探，管棚与管线A实测竖向净距为1.00~1.16m，与管线B竖向净距为0.53m~1.46m。

区间隧道与输水管线之间打设 $\varnothing 299 \times 400$ mm密排管棚，以桩梁体系为管棚支座，并辅以地面注浆加固的应急措施。本方案需开挖3个工作坑，1#工作坑尺寸为 48.0×5.5 m，深7.72m；2#工作坑尺寸为 58.5×2.8 m，深7.72m；3#工作坑尺寸为 49.8×5.5 m，深7.72m；工作坑采用倒挂井壁工艺跳孔施工；管棚从两侧工作坑向中间顶进，管棚壁厚 $t=22$ mm，单根长度14.8m；桩顶连续梁尺寸为 1200×1600 mm、 1200×1200 mm，钻孔桩共16根，1、3#工作坑桩径1.0m，桩长20~25m；2#工作坑桩径1.0~1.2m，桩长25~28m。管棚施工完成后在钢管内灌注M10水泥砂浆，在桩顶施作连续梁，管棚两端锚入连续梁。

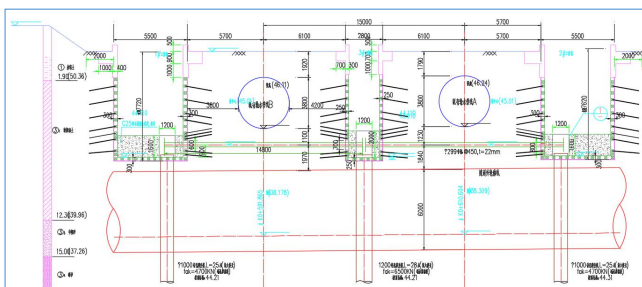


图2.1-1 既有输水管线加固剖面图

2. 盾构施工

区间隧道下穿输水管线，采用土压平衡式盾构法施工。盾构下穿管线前须做好试验段，取得详细施工参数，制定稳妥的盾构穿越方案，同时，下穿段须加强同步注浆与二次补强注浆。

为更有效地控制管线沉降，下穿范围采用克泥效工艺。

原设计管片每块设置一个注浆孔，下穿段采用多孔管片，即标准块、临接块每块增设2个注浆孔，便于后续二次补强注浆与深孔注浆。

3. 自动化监测

管线加固保护、盾构下穿施工采用自动化监测及人工复核相结合的方式对管线变形情况进行监测。管线整体沉降控制值为10mm，管线差异沉降控制值为8.7mm（差异沉降根据管线管节处允许转角 0.25° ）计算。

自动化监测系统是基于测量机器人的有合作目标（照准棱镜）的变形监测系统。测量机器人自动变形监测系统硬件从空间分布上划分为监测区域内的监测设备和布设于办公室的远程控制设备。监测区域内测量机器人、基准点和监测点棱镜构成监测系统的主体，测量机器人（测站点）和基准点布设于变形区域之外的稳固不动处，监测点布设在管顶并与管顶可靠连接，通过测杆伸出地面与棱镜连接作为管线变形的传递装置，其他设备布设在控制箱内，主要包括：无线远程电源开关、温度气压传感器、无线路由和工控机等。办公室是系统远程控制及数据处理的交互中心，需运行远程控制及后处理系统的计算机和接入Internet网络的无线路由等软、硬件。

（二）支托体系施工及优化

1. 支托体系施工工艺

（1）测量放线

根据设计位置在工作坑墙壁上作出标记，控制管棚设备和钢管的就位与施工中检查、调整，保证施工精度。

（2）安装导轨

工作坑底板上安装设备机架，测定导轨中心线并进行精确定位，然后进行固定，导轨安装精度轴线位置3mm，顶面高程 $0 \sim 3$ mm，两轨内距 ± 2 mm。

（3）设备就位、安装、调试

按照导轨位置将设备安装就位，并仔细检查设备位置与管棚设计轴线是否吻合，并进行调整以满足要求。安装完毕后对设备进行空载调试，确保设备性能的完好。

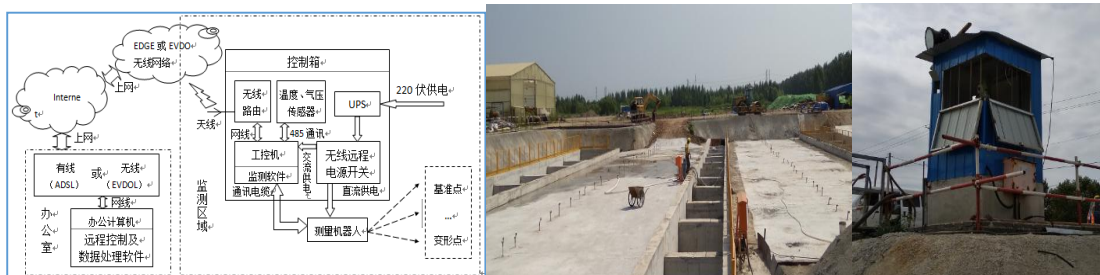


图2.1-2 自动化监测示意图

(4) 铺管顶进

①割除工作坑井壁钢筋成槽。

②设备调试完成后移至标准孔位置就位，检查后背钢板与井壁初衬间隙。

③将钢管定位于钻机顶推盘，推动钢管进入孔位入土1m后安装带有钻头的螺旋钻具，调校钢管与钻具同轴。

④旋转螺旋钻具，匀速(100~120mm/min)顶进钢管，相邻两节钢管管节的焊缝须错开，循环顶进直至完成设计钢管长度。

⑤跟踪测量数据并记录，钢管角度保持水平，先采用水平尺粗调，再用水准仪精调，管内若发生角度偏转，采用楔形钻头纠偏。

⑥回拔钻具，清理管内土体，移机施工相邻钢管。

(5) 顶管纠偏

轴线偏差控制采用水位管量测，每顶进2m测量记录，发生偏差时及时调整。螺旋出土钻具前端安装楔型钻头，正常旋转钻进时推进钢管沿直线前进，纠偏作业时将钻头楔面调至已经偏斜的方向，钻头由于斜面的作用就会向相反的方向偏斜，以此调整钻进的方向。

(6) 接管

钢管连接接口切60°坡口，焊接前检查钢管的水平、垂直位置及同轴情况。

(7) 设备移位、下一孔施工：顶进完毕后平移设备，循环顶进。

(8) 钢管内注浆

钢管顶进完成后封堵钢管两端，采用砂浆泵向钢管内压注水泥砂浆。在较高端管顶开孔焊接 $\phi 32 \times 3.5\text{mm}$ 钢管做为排气孔，较低端封堵钢板上开 $\phi 80\text{mm}$ 孔，注浆导管深入钢管内8m位置，注浆时以排气孔漏浆指标控制钢管内浆液是否注满，单根钢管注浆量为 0.756m^3 。

(9) 钢管外注浆

每根钢管上方焊接1根9m长 $\phi 32 \times 3.5\text{mm}$ 钢管作为注浆导管同步加固钢管周边扰动土体，小导管前6m开漏浆孔，间距500mm。注浆材料采用水泥浆，水泥浆水灰比1:1，注浆压力控制在不大于0.5Mpa。

(10) 桩顶连续梁施工

1、2#基坑内连续梁尺寸为 $1200\text{mm} \times 1600\text{mm}$ ，3#基坑内连续梁尺寸 $1200\text{mm} \times 2000\text{mm}$ ，管棚锚入连续梁内，连续梁混凝土与回填混凝土一次浇筑成型。

2. 支托体系施工总结

(1) 管线两侧工作坑倒挂井壁施工阶段做好中隔壁和初支挂网喷浆工作，管线基本不会出现沉降。

(2) 工作竖井的锁口圈梁与下方的倒挂井壁初支做好竖筋连接，包括下方各处连接，防止整体脱落。

(3) 工作竖井中隔墙、角撑及下部工字钢支撑，须支撑稳固。

(4) 顶管钢管顶进采取单根顶进，禁止双管同时顶进。

(5) 顶管钢管顶进禁止使用楔形头，调向用楔形板在满足使用要求时尽可能小。

(6) 软土地层中管棚钢管顶进采取不出土方式，

在接收段可适量出土。

(7) 经常检查工作井预留槽竖向支撑钢筋，防止脱焊；钢管顶进时在不影响施工的情况下尽可能晚地割除；钢管顶进完成后，及时在钢管上下采用槽钢支撑焊接(与钢管、初支)，保持整体稳定性。

(8) 顶管钢管完成后，在钢管端头做好底板上的竖向支撑，防止钢管整体下沉发生。

(9) 管棚钢管顶进完成后，尽可能缩短喷锚封闭间隔时间，防止暴露变形。

(10) 顶管钢管管壁外侧小导管注浆：钢管顶进时，在外侧随之带入小导管，小导管间隔500mm打设花孔，顶进时注意花孔、管节连接处的防护工作，避免泥渣、注浆堵塞。按施工简便考虑，可间隔2-3根安设小导管；按注浆填充饱满度考虑，每一个空隙都需安设小导管。

(11) 连续梁及时跟进施作，将整个支托体系形成整体，并进行土方回填。连续梁分节点尽量在弯矩零点附近，且须做好凿毛处理。

(12) 如仍出现沉降变形较大的不良状况，在管线两侧采取对称深孔注浆的加固措施：浆液采取水泥单液浆，注浆压力严格控制，根据管线承受压力与地质、深度有关，一般不超过0.5Mpa；注浆不可一次性注入太多，需多次“打点滴式”注入，防止破坏管线。

(三) 盾构施工技术

1. 盾构施工工艺

(1) 试验段

通过100m试验段，按照与盾构下穿输水管道同样措施模拟。通过分析地层沉降变形数据等，选取最佳施工参数，达到试验的目的，以确保下穿输水管道安全。

表2.3-1 试验段施工预期达到的目的

序号	步序	实现盾构施工参数/目的
1	盾构掘进	掌子面土压力、刀盘转速、刀盘扭矩、推进速度、螺旋机转动速度、推进力、出土量、渣土改良
2	同步注浆	配合比、注浆压力、注浆量(注入系数)
3	管片拼装	熟练掌握盾构机操作方法与管片拼装工艺
4	克泥效工艺	配合比、注入压力、注入量
5	二次注浆	注浆压力、注浆量
6	工序协调	使各工艺流程、工种协调配合
7	停机管理	停机时掌子面土压力控制及注浆控制

(2) 产权单位配合

提前与产权单位沟通协调，尽量做好下穿期间管线停水或轮换供水，并做好相应应急措施。

(3) 主要施工工序

①盾构推进

通过添加泡沫剂等渣土改良措施将渣土调整至塑流状，根据理论计算与沉降监测相结合确定掌子面土压力，将各项推进参数(掌子面土压力、刀盘转速、刀盘扭矩、推进速度、螺旋机转动速度、推进力等)有机结合，有效控制出土量。

②同步注浆

根据盾构设备不同，同步注浆有水泥砂浆、双液浆

等方式。以水泥砂浆为例，主要控制指标包括配合比、胶凝时间、泌水率、浆液稠度等，注入控制以注浆量和注浆压力双重控制。

③管片拼装

管片拼装控制重点包括拼装顺利自下而上，封顶快一般设置在起拱线以上；管片环面和相邻环高差的控制；超前量和椭圆度的控制；管片螺栓的紧固等。

④二次注浆

二次注浆一般在以下情况下进行：同步注浆不饱满或固结收缩造成地层存在较大间隙、地层沉降变形较大、区间下穿重要建构筑物、管片衬砌结构渗漏水等。

二次注浆通过衬砌管片注浆孔（吊装孔）注入，采用单液浆（水泥浆）或双液浆（水泥-水玻璃双液浆），特殊部位施工时，采用多孔管片，便于更有效地注浆加固。

二次注浆选择盾构机盾尾后6~10环进行注入，可选择左上/右上孔位进行注浆。对压入位置、压入量、压力值做好详细记录，观察管片是否变形，并根据地层

变形监测信息及时调整，确保压浆工序的施工质量。

⑤克泥效工艺

克泥效工法是将高浓度的泥水材料与塑强调整剂（即水玻璃）两种液体分别以配管压送到指定位置，再将此两种液体以适当比例混合成高黏度塑性胶化体后，再通过径向孔注入的一种新型工法。混合后的流动塑性胶化体不易受水稀释，且其黏性也不会随时间而变化。

盾构主机通过时地层沉降，主要是由于盾构机土体开挖后，刀盘开挖轮廓与盾体外缘之间的空隙未及时填充造成的如果地层不稳定，且盾构施工不正常停机时间过长，容易造成地层的沉降。如果盾构主机外侧的空隙能够得到有效填充，将有效减小地层沉降，在盾体外注入克泥效，及时填充刀盘开挖轮廓与盾体外缘之间的空隙，从而达到控制沉降的目的。

克泥效每立方米用量400~700kg；水玻璃：波美比Be40，比重1.38~1.39；克泥效：水玻璃=20：1；使用量0.8~1.0m³/环。

2. 盾构施工总结

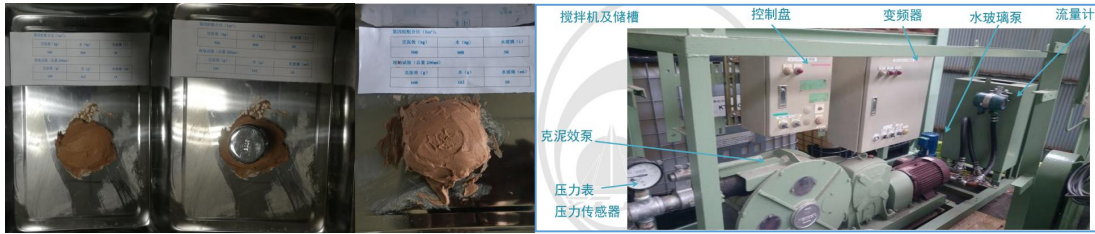


图2.3-1 克泥效试验及现场设备

盾构法施工通过调整盾构掘进参数、加强同步注浆与二次注浆等措施减少对周边环境的影响，必要时可通过地层加固、隔离防护等措施有效控制风险。

(1) 通过试验段监测反馈，优化掘进参数，提前设定推进速度、调整排土量，保证土舱压力与地层压力的平衡。

(2) 加强盾构掘进参数管理。按风险工程沉降控制标准对盾构土仓压力、推进速度、总推力、出土量、刀盘转速、注浆量和注浆压力等参数进行优化。根据不同阶段地层变形制定相应控制措施。

(3) 快速拼装管片，减少盾构机停机时间；做好机械检修，避免中间停机、漏浆或注浆系统堵管等不良情况发生。

(4) 加强渣土改良措施，减小刀盘扭矩和总推力，降低对地层的扰动

(5) 在盾构掘进中加强同步注浆。确定浆液配比，注浆压力、注浆量及注浆起讫时间对同步注浆能否达到预期效果起关键作用。

(6) 采用水泥浆对衬砌背后实施二次注浆，重点对隧道拱部范围进行二次注浆，控制后期沉降，注浆应结合监测信息及时调整。

(7) 盾构下穿重要建构筑物，采用克泥效工艺。

(8) 管片采用多孔管片，根据监测情况，必要时采取径向注浆措施加固地层，注浆完成后应及时封堵注浆孔。

(9) 采用“适当推进力，匀速通过”的方式组织盾构施工，尽量减少盾构施工前期地层变形。

(10) 建立完善的监测网，及时反馈信息指导施工。

(11) 加强盾构姿态控制，曲线段提前将盾构姿态控制在弧线内侧30-40mm，纠偏采取缓纠慢纠原则。^[2]

(12) 现场管控升级，领导带班，做到重要施工参数、管控措施落实到位。

(四) 自动化监测

盾构下穿输水管道施工，通过自动化监测反馈，在刀盘到达管线下方时管线基本呈微微隆起状态（变化量约0.5mm），主机下穿过程中管线隆起量基本在0.1-0.9mm，衬砌管片脱离盾尾后管线隆起量基本在1.5mm，完全通过2天左右地层变形基本稳定，最终两条管线的变形量在±3mm范围内。

三、结论

区间隧道下穿大直径PCCP输水管道过程中各项措施落实到位，顺利通过风险源。前期的灌注桩+连续梁+管棚支托体系起到相当大的作用，有效延缓地层沉降的时效性；盾构施工各项措施制定、落实到位，沉降基本可控，满足安全顺利穿越的需求。

参考文献

[1] 马云新. 克泥效抑制沉降工法在盾构近距离下穿地铁既有有线工程中的应用. 施工技术, 2015.
 [2] 张臣根. 盾构机过小半径圆曲线隧道施工分析及控制要点. 城市建设理论研究, 2013, 6期.