

富水砂层地质下定向钻护壁及精准定位关键技术

刘础豪
(中交一航局第三工程有限公司)

摘 要：为确保管道在富水砂层地质条件下敷设时施工顺利开展，以监利市城西配套管网项目的水平定向钻施工为对象，通过选取合适的钻进设备、设计泥浆配比方案、落实定位和稳孔等施工措施，同时关注施工过程中的注意事项，成功提炼出富水砂层地质条件下水平定向钻施工的关键技术与参数。在实际应用中成功避免了管道偏移、钻孔塌陷等质量问题，为类似地质环境的工程提供了极具价值的参考依据与实际工程经验。

关键词：水平定向钻；富水砂层；定向钻；泥浆配比

1 工程概况

监利市城西配套管网项目的污水管道施工采用水平定向钻施工工艺。该项目污水管道选择采用 PE100 聚乙烯管道 (SDR11)，管径分别为 DN500、DN630 和 DN800，管道深度在 4.5~7.8 m 之间，施工总长度达 1 840 m。污水管道的施工地点位于湖北省荆州市监利市临近长江支流区域，属于典型的长江河床地层结构。根据地勘资料显示，本工程污水管道水平定向钻穿越区域均为富水粉砂层，施工过程中对水平定向钻进行计算和研究。

根据静力触探、钻探、孔内原位测试和土工试验等多种方法，将勘察深度范围内的土体分为七大层八小层。

各土层厚度、空间分布、岩土特性、工程特性等见表 1。

表 1 工程地质分层

土层号	土层名	时代成因	厚度/m	空间分布	岩土特性	工程特性
①	素填土	Q ^{ml}	0.50~1.60	沿线均有分布	杂色，稍密，高压缩性，略具湿陷性，主要以黏性土为主，层间局部夹有粉细砂	高压缩性
②	粉质黏土	Q ₄ ^{al}	0.6~2.20	沿线均有分布	褐灰色，软—可塑，刀切面较光滑，层中间夹粉土，粉土以 10~20 cm 薄层间夹层中	承载力一般、压缩性中等
③	淤泥质黏土夹粉砂	Q ₄ ^l	1.0~3.80	沿线均有分布	灰褐色，流塑，饱和，含少量的腐殖物	承载力低，压缩性高
④	粉砂	Q ₄ ^{al}	0.5~2.80	沿线局部缺失	青灰色，松散，饱和，主要由石英和长石构成，间带少量的云母碎片，粒状结构	承载力高，压缩性低
⑤ ₁	淤泥质黏土	Q ₄ ^l	1.5~6.20	沿线均有分布	灰褐色，流塑，饱和，含少量的腐殖物	承载力低，压缩性高
⑤ ₂	粉砂	Q ₄ ^{al}	0.5~2.20	沿线局部缺失	青灰色，松散，饱和，主要由石英和长石构成，间带少量的云母碎片，粒状结构	承载力高，压缩性低
⑥	黏土	Q ₄ ^{al}	3.5~11.0	沿线均有分布	褐灰色，软—可塑，饱和，刀切面光滑	承载力一般，压缩性中等
⑦	粉砂	Q ₄ ^{al}	7.60	沿线部分位置	青灰色，稍密—中密，饱和，主要由石英和长石构成，间带少量的云母碎片，粒状结构，层中间夹粉土薄层	承载力高，压缩性低

2 施工准备

结合现场地质和土体压力情况综合考虑，选定型号 ZT-180 水平定向钻机施工，钻机性能参数为：额定扭矩 78 000 N·m；入土角调整范围 8°~18°；扩孔钻规格 $\phi 400\sim\phi 1\,500$ mm；泥浆泵排量

600 L/min；回拖力 1 800 kN 或 2 400 kN；回拉速度 42.7 m/min；钻机结构形式为履带式；控向方式为无线。

2.1 管线探查

由地下管线权属单位将管线情况标记交底，

并按照设计图纸将管道位置、工作坑位置测放到施工现场,固定好定位桩。经复检无误后,将钻机轴线、钻孔出入口位置施放在地面与工作坑内。导向钻钻进前在地面沿成品管轴线每隔适当长度做好标记点,控制好第一节钻杆的起点。

2.2 测量放线

测量工作在水平定向钻施工质量中起到关键性作用,施工测量严格控制在设计允许值范围内,确保不出差错,严禁出现由于测量数据的偏差导致现场返工和质量事故。为了确保工程测量的准确性,采取措施主要包括:

1) 严格复测测量交底数据,复测成果报审批准后方可进行现场施工放样和测量。及时报审施工过程中增设的基准点等数据,保护测量基准点并进行复测。

2) 按设计图纸放出拟敷设管线的中心线,确定入土点、出土点,并在中心线上标示穿越障碍和交叉管线的位置。根据入土点、出土点及中心线,确定入土工作坑、出土工作坑、施工便道以及管线预制场地等的范围^[1]。

3 施工作业

3.1 施工工艺流程

水平定向钻施工工艺流程根据现场地质情况和设计图纸要求综合确定,工艺流程图见图 1。

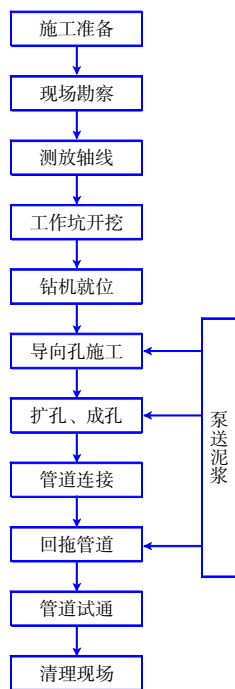


图 1 水平定向钻施工工艺流程图

3.2 工作坑开挖

工作坑的长度方向与设计轴线方向一致,保持工作坑四周边坡稳固,土体牢固,工作坑开挖为长条形^[2],尺寸则根据现场作业面的范围设置。工作坑周围 1.5 m 外设置栏杆,栏杆高出周围地面 1.2 m。

先人工开挖“十字”探坑,在施工开挖阶段,若遭遇事先未探测到的不明管线、地下障碍物,立即上报现场状况,对不明管线和障碍物妥善保护,禁止损坏公共设施。工作坑开挖采用人工与机械协同作业的方式,人工将土方搬运至挖机铲斗,再由挖机将土方转运至运输车辆。人机配合施工安全至关重要,安排专人指挥挖机操作,保障施工安全。

钻机工作坑支护的选择要充分考虑以下因素:

1) 保障工作坑具备足够的稳定性,为坑下作业人员提供安全可靠的作业环境,杜绝安全隐患。

2) 确保起始工作坑有满足净空施工作业要求的最小工作面,便于施工活动的顺利开展。

3) 针对地上、地下的建筑物、构筑物以及管网,制定易于实施的保护方案和安全施工措施,避免施工造成破坏。

4) 充分考虑地层条件和地下水状况,使支护方案与地质条件相适应,保证支护效果。

3.3 钻进泥浆配比设计

施工前根据每段管道长度配置钻孔泥浆,泥浆在专用搅拌容器或搅拌池中配制,由于管段较多,且地表构筑物较为复杂,本工程选用搅拌容器进行膨润土泥浆配置。水平定向钻钻孔过程中需保持稳定的泥浆循环,若施工中断,孔内的循环泥浆定时补充,起到润滑钻头的作用,防止泥浆缺失和卡钻。施工产生的泥浆废料需抽排处理,严禁将废料排入市政管道或生态沟渠中。

配制泥浆使用自来水或经过滤的 pH 值不小于 8~10 的水源,配置过程中无固体物质,避免造成输浆管道和导向钻具堵塞,重点关注水化时间,依据地层结构和施工工序按照既定的添加剂掺入比例添加,及时调节泥浆的黏度、相对密度等指标,指标参数见表 2,确保泥浆性能可靠。同时关注泥浆携带的钻屑粒径、黏度、返浆量,控制泥浆泵的流量及压力。由于回拉管需要的钻进泥浆量大,预先准备不少于 16 m³ 的泥浆,存放在泥浆搅拌器内,随时根据使用量补充。

表 2 泥浆性能要求

地层类型	马氏漏斗黏度/s	塑性黏度/(MPa·s)	动切力/Pa	静切力/Pa		滤失量/mL	pH 值
				G_{10s}	G_{10min}		
松散粉砂、细砂及粉土	60~90	12~15	>10	5~10	15~20	8~12	9.5~11.5
密实粉砂、细砂层和砂岩、泥页岩	50~60	8~12	5~10	3~8	6~12	8~12	9.5~11.5
花岗岩等坚硬岩石层	40~55	8~12	5~8	2~6	5~10	10~20	9.0~11.0
中砂、粗砂、卵砾石及砾岩层	80~120	15~25	>10	5~10	15~20	8~12	9.5~11.5
黏性土和活性软泥岩层	35~50	6~12	3~6	2~5	3~8	8~12	9.0~11.0

3.4 钻机试钻

对水平定向钻钻机进行组装、试运转，调试运转满足施工要求后，开始钻进 1~2 根钻杆，钻进过程中观察设备运行情况，若符合钻进施工，按照钻孔长度依次顶进钻杆，保证导向钻顺利成孔。

3.5 穿越施工技术参数

3.5.1 管线轨迹设计

先导孔轨迹示意图(图 2)直观展示了先导孔在地下的钻进路径及计算需使用到的参数。图中： a_2 为入土端曲线的水平长度，m； R 为曲率半径，m； α 为入土角，(°)； b_2 为入土端曲线的高度，m；

b_1 为入土端直线段的高度，m； h_1 为入土端地面与底部直线段的高度，m； a_1 为入土端直线段的水平长度，m； β 为出土角，(°)； d_2 为出土端曲线的高度，m； d_1 为出土端直线段的高度，m； h_2 为出土端地面与底部直线段的高度，m； c_1 为出土端曲线段的水平长度，m； c_2 为出土端直线段的水平长度，m； L_0 为底部直线段长度，m； L 为穿越长度，m。

计算水平定向钻先导孔轨迹的各项参数：

$$b_2=R\times(1-\cos \alpha) \tag{1}$$
$$b_1=h_1-b_2 \tag{2}$$
$$a_1=b_1/\tan \alpha \tag{3}$$

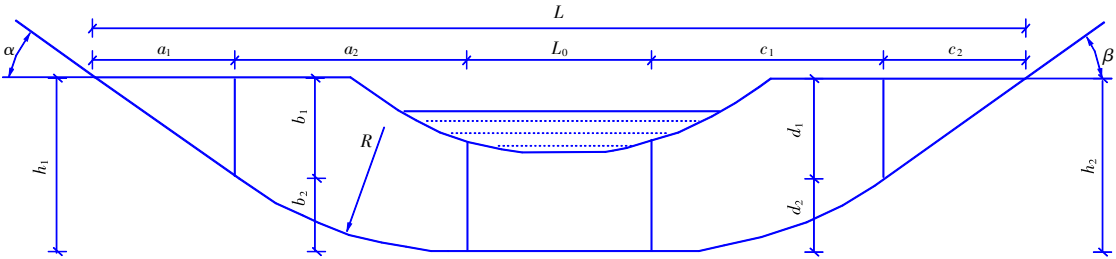


图 2 先导孔轨迹示意图

根据规范要求，入土端直线段与出土端直线段长度一般为 10~20 m(不小于 3 倍钻杆长度)，本项目采用 $\phi 102\text{ mm}$ 钻杆，单根长度 6 m，设定入土端与出土端直线长度为 18 m， R 取值见表 3。

表 3 先导孔轨迹参数表

管材类型	入土角/(°)	出土角/(°)	曲率半径/mm	
			$400\text{ mm}\leq D<800\text{ mm}$	$D\geq 800\text{ mm}$
塑料管	8~30	4~20	不小于 $250D$	不小于 $300D$

注：D 为管道公称外径。

由表 3 可得，各施工段落 R 值见表 4。

表 4 先导孔轨迹曲率半径取值表

施工段落	施工长度/m	管道最大埋深 h_1 /m	管道最小埋深 h_2 /m	管道公称外径/mm	曲率半径 R /m
第一段落	224	4.34	3.14	500	125.0
第二段落	920	5.44	4.01	630	157.5
第三段落	440	7.62	6.76	800	240.0

将表 4 数据代入公式： $R\times\cos \alpha-18\times\sin \alpha=R-h_1$ ，可推算出 α 角度，进一步可推算出各项参数，见表 5。

表 5 先导孔轨迹参数计算表

施工段落	$\alpha/(^{\circ})$	a_1/m	a_2/m	b_1/m	b_2/m	h_1/m	$\beta/(^{\circ})$	c_1/m	c_2/m	d_1/m	d_2/m	h_2/m	R/m	L_0/m	L/m
第一段落	10	13.84	21.70	2.44	1.90	4.34	8	17.40	13.66	1.92	1.22	3.14	125.0	224	290.60
第二段落	9	22.10	24.64	3.50	1.94	5.44	9	24.64	13.07	2.07	1.94	4.01	157.5	920	1 004.45
第三段落	11	16.51	45.79	3.21	4.41	7.62	10	41.68	17.64	3.11	3.65	6.76	240.0	440	561.62

3.5.2 终孔孔径、扩孔次数、管道回拖力

1) 终孔孔径

本次拖拉管道直径为 500 mm、630 mm、800 mm，根据规范要求，穿越管道所需的钻孔最终扩

孔直径要求见表 6。

表 6 钻孔最终扩孔直径

管道外径 D/mm	最终扩孔直径/mm
200~600	$(1.2\sim 1.5)D$
>600	$(300\sim 400)+D$

由表 6 计算可得, 成孔孔径不大于 750 mm、900 mm、1 200 mm。

2) 扩孔次数

分级扩孔时每次回扩的极差宜控制在 100~150 mm, 对于 DN500 管道, 采用 150 mm、300 mm、450 mm、600 mm、750 mm 五级扩孔; 对于 DN630 管道, 采用 150 mm、300 mm、450 mm、600 mm、750 mm、900 mm 六级扩孔; 对于 DN800 管道, 采用 150 mm、300 mm、450 mm、600 mm、750 mm、900 mm、1 050 mm、1 200 mm 八级扩孔; 不可越级扩孔。

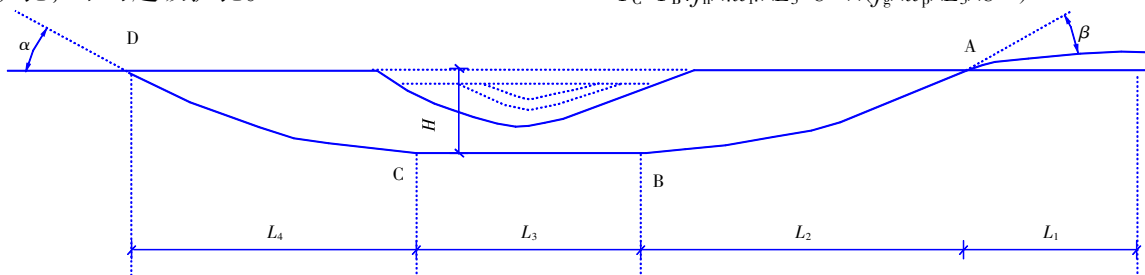


图 3 轨迹示意图

$$T_D = e^{f_h \alpha} [T_C + f_h \times |w_f| \times L_4 - w_f \times H - e^{f_g \beta} \times (f_g \times w_p \times L_4 \times e^{f_g \beta})] \quad (7)$$

式中: T_A 为 A 点处管道所受的回拖力, kN; T_B 为 B 点处管道所受的回拖力, kN; T_C 为 C 点处管道所受的回拖力, kN; T_D 为 D 点处管道所受的回拖力, kN; L_1 为由管道焊接和热收缩而额外增加的管道长度, m; L_2 为管道入土端曲线段所对应的水平长度, m; L_3 为管道最大埋深处水平延伸距离, m; L_4 为管道出土端曲线段所对应的水平长度, m; H 为管道埋深, m; f_g 为塑料管道与地面之间的摩擦系数, 取 0.5; f_h 为塑料管道与孔壁的摩擦系数, 取 0.3; w_p 为单位长度管道重力, kN/m; w_f 为单位管道长度所受的净浮力。

选取第二段落参数代入式(4)~式(7)可得: $T_A = 53.97$ kN; $T_B = 125.78$ kN; $T_C = 1\,077.84$ kN; $T_D = 1\,154.59$ kN。

根据计算结果可知, 为满足额定回拖力大于计算回拖力 1.5~3.0 倍的要求, 则选择 ZT-180 型钻机, 最大回拖力为 1 800 kN。

3.6 导向孔钻进

精准导向孔钻进将导向仪放置在工作坑边缘的钻杆正前方, 根据测量数据的交底内容将钻机位置和钻孔位置现场放样, 在平整地面设计管道轴线位置上固定钻机设备。根据计算确定的入钻角度控制钻杆钻进角度, 测量人员辅助放样入钻

3) 管道回拖力

最大控制回拖力满足管材力学性能和设备能力的使用要求, 可以采用递推关系式用来估算出需要的回拖力, 图 3 为定向钻施工过程中管道回拖的轨迹。

选取具有代表性的 4 处进行回拖力计算, 根据 4 处的计算结果选取满足施工需要的水平定向钻钻机。

$$T_A = e^{f_g \beta} \times f_g \times w_p \times (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \quad (4)$$

$$T_B = e^{f_h \beta} \times (T_A + f_h \times |w_f| \times L_2 + w_f \times H - f_g \times w_p \times L_2 \times e^{f_g \beta}) \quad (5)$$

$$T_C = T_B + f_h \times |w_f| \times L_3 - e^{f_g \beta} \times (f_g \times w_p \times L_3 \times e^{f_g \beta}) \quad (6)$$

角度; 钻杆钻进轴线与设计管线轴线控制误差允许范围内, 设备基础平整, 底座稳固。

通过计算得出导向孔的标高数据, 并在现场原地面进行放样标记, 标高点放样间距为 1 m, 原地面有明显标高变化的区域进行加密设置。按照设计钻孔轨迹采用 DCI 导向探测仪实时监测, 钻头实际位置监测间距为 1 m, 若发现与设计轨迹产生偏差, 立即纠正, 保证钻孔的精准度, 做好过程中记录。控制坡度利用导向仪测得深度、倾角(最小增量 0.1%)、面向角等值, 控制钻机钻进及泥浆供给, 确保坡度、轴线、高程的准确性。遇到障碍物时认真分析、及时汇报、采取相关解决措施。

导向孔施工前, 钻进设备需进行试运行, 时间不得低于 15 min, 确保钻机设备的各个部分和泥浆喷射系统能够正常运行, 检查合格后方可投入使用。

首根钻杆导向钻进时采用轻压慢转的方式, 确保入土的位置准确且稳定, 测量钻杆角度满足入土角后方可钻进, 否则及时进行调整。导向孔钻进过程中, 直线段落的测量数据按照钻杆的长度为基准, 每节作为 1 次测量间隔。控向员及时将测量数据与设计值对比, 引导钻机司机调整钻进轨迹。

钻进至既有管线临近区域时, 慢速钻进并复

核先导孔轨迹,测算与交叉管线的距离,确认在安全许可范围后再恢复正常钻进。导向孔钻进途经曲线段落时,采取分段钻进且单次顶进长度控制在0.5 m以下,从而保证延伸长度顶角的变化曲线均匀可控。遇到异常情况时,停钻查明原因,问题解决后再继续施工。

3.7 扩孔

导向孔钻进完成后,在钻头处安装回扩器,将导向孔孔径扩至原孔径的1.5倍。在出钻位置将回扩钻头安装在钻杆上回拉扩孔,依据扩孔进度及时加减钻杆。扩孔钻进前确认扩孔器喷嘴畅通,拌制好的泥浆液通过钻杆→扩孔器→孔道的顺序以达到泥浆护壁的作用。一级扩孔完成后,结合扩孔过程中扭矩、拉力及返浆情况判断孔内清洁状况,若孔内钻屑量偏多且孔径未达要求,洗孔后再进行下一级扩孔。扩孔过程中,如发现扭矩、拉力异常,需降低进尺速度,判断孔内状况并调整相关技术参数,及时填写扩孔钻进记录。扩孔完成后,根据孔内清洁程度确定是否清孔。

3.8 管道回拖

管道回拖前,检查钻机稳定性及各类设备运行情况,所有管道均完成热熔连接,根据场地的实际情况,在不影响交通的前提下,尽量一次性焊接完成。如果场地不允许,可分段焊接摆放,在拉管过程中逐段焊接以保证交通畅通。

焊接完成的管道需在设计管道轴线位置上,待回拖管道吊装至出钻口的延长段上,确保与设计管道轴线无夹角。保证管道回拖施工连续,如遇特殊情况需中断施工,时间不得超过4 h。回拖速度均匀平稳,减少对孔内压力的平衡影响。回拖过程中孔道内保持泥浆循环护壁,避免造成塌孔的质量风险。管道回拖施工完成后,立即测量管道轴线,并记录归档。若两端不能立即进行连接施工,需对管道两端临时封堵,保证管道内的干燥、清洁。

3.9 注浆加固

管道环空段视情况进行注浆加固处理。注浆压浆采用水灰比0.5~0.55水泥浆,注浆水泥采用P·O42.5普通硅酸盐水泥,造斜段采用C15混凝土填至道路面层底部。管道拖拉完毕后要及时注

浆,防止塌孔导致路面塌陷。

4 工艺控制措施

1) 防止钻孔时呈S形孔洞轨迹的措施:在水平定向钻钻进过程中对全角变化率指标进行严格控制,缩短测量间隔距离^[3]。本段落均为粉细砂层,故测量间距 ≤ 2 m。调整钻杆角度要迅速并留有调整空间,严禁大角度调整钻杆,防止出现S形孔洞轨迹。

2) 将定向钻施工误差控制在范围内的措施:将定向钻钻机位置进行放样标记,采用全站仪放样提高测量精度。精准测量标定控向参数,按照需求多测取参数数据以供比较,确定出最佳参数,在管轴线上的3个不同位置测取,且每个位置至少测量4次,做好数据记录^[3]。

3) 提高扩孔成功率的措施:按照计算所得的管线曲率半径,精准钻取导向孔,严禁出现S形孔洞轨迹。根据地勘资料对不同地层选择适配的泥浆护壁,本工程钻进段落地层为粉细砂层,根据泥浆配合比方案,确定膨润土泥浆配置流程,确保泥浆护壁起到保护作用。

5 结语

随着国内经济和市政管网系统的发展,管道翻新或改造的需求越来越大,水平定向钻非开挖技术具有不破坏地面、工作面小等优势,但是实际施工中经常会遇到各种地下未知的地层及管线,具有较大的施工风险。结合本工程实际情况,水平定向钻穿越粉砂地层时,要选择大功率钻机及泥浆排量大的泥浆泵,且根据砂层不同含量确定合理的泥浆配比设计。经过管道检测数据显示,在砂层地质条件下的管道敷设效果较好,未出现管道轴线偏差或塌孔等质量问题,可为后续类似施工环境下的水平定向钻施工提供技术依据。

参考文献:

- [1] 谭祖勇,曾子,刘晓燕.水平定向钻法管道穿越工程技术在城市复杂综合管线背景下的应用[J].水电站设计,2023,39(1):82-87,91.
- [2] 程里浩.定向钻进技术在污水管道施工中的应用[J].港口航道与近海工程,2024,61(S1):123-126.
- [3] 魏清典,张立刚.燃气管道沙河定向钻穿越关键工艺控制[C]//2006非开挖技术会议论文专辑.无锡:中国非开挖技术协会,2006:70-73.